

Faculté des bioingénieurs

Impact d'un dispositif de réduction des précipitations sur le statut hydrique de semis de chênes et de hêtres

Auteur : Félix Guillaume
Co-Promoteurs : Mathieu Jonard
Mathieu Javaux
Lecteur(s) : Caroline Vincke
Valentin Couvreur

Année académique : 2022-2023

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de Bioingénieur :
Gestion des forêts et des espaces naturels

Table des matières

Remerciements	4
Liste des figures	5
Liste des tableaux	6
1. Introduction	7
2. Etat de l'art	10
2.1. Enjeux liés à la foresterie	10
2.1.1. Introduction	10
2.1.2. Services écosystémiques.....	10
2.1.3. Menaces sur la stabilité des forêts	11
2.2. Résilience des forêts.....	11
2.3. Changements climatiques	12
2.4. Impact des changements climatiques sur la forêt	13
2.5. Fonctionnement hydraulique des arbres	14
2.5.1. Continuum sol-plante-atmosphère	14
2.5.2. Impact du manque d'eau	16
2.6. Le Hêtre et le Chêne face aux changements climatiques	19
3. Matériel et méthodes.....	20
3.1. Site d'étude.....	20
3.2. Dispositif expérimental.....	20
3.3. Capteurs et types de mesures	22
3.3.1. Conditions météorologiques.....	22
3.3.2. Statut hydrique du sol.....	22
3.3.3. Statut hydrique des semis.....	28
3.3.4. Croissance des semis	29
3.4. Traitement des données et analyses statistiques	29
3.4.1. Traitement général des données.....	29
3.4.2. Statistiques et Modélisation	30
4. Résultats et discussions.....	32
4.1. Conditions météorologiques durant la période d'étude	32
4.1.1. Température et précipitation	32
4.1.2. Radiation	33
4.2. Impact du dispositif de réduction des pluies sur le statut hydrique du sol	35
4.2.1. Teneur en eau du sol	35
4.2.2. Courbes de rétention en eau	38

4.2.3.	Potentiel hydrique du sol	41
4.3.	Impact du dispositif de réduction des pluies sur le fonctionnement hydraulique des semis 45	
4.3.1.	Potentiel hydrique de la tige	45
4.3.2.	Mesures ponctuelles du potentiel hydrique de la feuille	49
4.3.3.	La conductance stomatique	52
4.4.	Impact du dispositif de réduction des pluies sur la croissance et la survie des semis	56
5.	Synthèse	59
6.	Conclusion	62
	Bibliographie	63

Remerciements

Ce mémoire n'a été possible qu'avec l'aide de plusieurs personnes que je tiens à remercier chaleureusement.

Tout d'abord, je tiens à remercier grandement mes promoteurs Mathieu Jonard et Mathieu Javaux ainsi que Frédéric André sans qui ce mémoire n'aurait pas lieu. Merci pour votre patience, vos encouragements, votre disponibilité et vos bons conseils. Merci de m'avoir intégré au sein du Earth and Life Institute et de m'avoir tant appris.

Je voudrais également remercier spécialement Gilles Tilman pour avoir mené ensemble la campagne de mesures et pour toutes ces heures passées en forêt et en labo.

Je tiens à remercier Valentin Couvreur, Louis Deval, Tinajiao Wei, Andréa Cecere et Adrien Luyckx de m'avoir appris et formé aux différentes sondes et instruments de mesure qui ont pu être utilisés dans ce mémoire.

Je souhaite remercier Sébastien François et François Plume pour leur aide très précieuse lors de l'installation des sondes et pour leur confiance et leur disponibilité dans le prêt de matériel.

Merci également à mes amis Artur, Ricardo, Tim, Fanny, Aristote, Martin, Léo de m'avoir accompagné en forêt.

Je souhaite remercier Fanny, Sylvie et Aristote pour leurs qualités de correcteurs orthographiques sans qui ce mémoire ne ressemblerait pas à grand-chose.

Finalement, je souhaite remercier Caroline Vincke et Valentin Couvreur d'avoir accepté de faire partie du jury de ce mémoire.

Liste des figures

Figure 1. Les différents types de résiliences	12
Figure 2. Schéma conceptuel du mouvement de l'eau le long du continuum sol-plante-atmosphère 15	
Figure 3. Schéma conceptuel des principaux processus physiques de mortalité des arbres selon la durée et l'intensité de sécheresses	18
Figure 4. Situation géographique des zones d'étude	20
Figure 5. Représentation schématique du dispositif expérimental.....	21
Figure 6. Photo du dispositif de réduction des pluies	21
Figure 7. Comparaison de différentes formes d'équation pour prédire au mieux la relation entre la permittivité et la teneur en eau	25
Figure 8. Données météorologiques de cumul de pluviométrie journalière en mm et de température moyenne journalière	32
Figure 9. Température maximum journalière de l'air et pluviométrie journalière.....	33
Figure 10. Rayonnement transmis.....	34
Figure 11. Suivi temporel du rayonnement photosynthétique actif journalier	35
Figure 12. Suivi temporel de la moyenne de la teneur en eau du sol	36
Figure 13. Impact d'une réduction des pluies sur la teneur en eau du sol	36
Figure 14. Lien entre la teneur en eau du sol et le potentiel hydrique du sol	39
Figure 15. Représentation des courbes de rétention de Van Genuchten	40
Figure 16. Relation entre le pF et la teneur en eau du sol	41
Figure 17. Suivi temporel du pF du sol	42
Figure 18. Impact d'une réduction des pluies sur la teneur en eau du sol	42
Figure 19. Suivi temporel du pF	44
Figure 20. Impact de la réduction des pluies et du capteur utilisé sur le pF journalier du sol	44
Figure 21. Suivi temporel du potentiel hydrique du sol et des tiges	46
Figure 22. Impact du type de capteur et du traitement sur le potentiel hydrique du sol et de la tige 47	
Figure 23. Relation entre le potentiel hydrique de la tige et celui du sol de jour et de nuit	48
Figure 24. Relation entre la différence de potentiel de la tige de nuit et de jour et le potentiel du sol ainsi que du potentiel de tige de nuit pour le graphique. Illustrés selon le traitement	49
Figure 25. Impact de l'effet de l'espèce et du traitement sur le potentiel hydrique des feuilles	50
Figure 26. Suivi temporel du potentiel hydrique de la tige et du potentiel des feuilles.....	51
Figure 27. Relation entre le potentiel hydrique de feuilles et le potentiel hydrique des tiges (a) et du sol (b)	51
Figure 28. Impact de l'effet de l'espèce et du traitement sur la conductance stomatique.....	52
Figure 29. Relation entre la conductance stomatique et différentes variables illustrées selon l'espèce	54
Figure 30. Résultats de prédiction de la conductance stomatique par un modèle bivarié utilisant le potentiel hydrique de la feuille	55
Figure 31. Résultats de prédiction de la conductance stomatique par des modèles multivariés avec comme variable explicative le potentiel hydrique du sol et le déficit de pression vapeur de l'air.....	55
Figure 32. Pousse terminale et accroissement radial lors de l'année 2021 et 2022	57

Liste des tableaux

Tableau 1. Paramètres et statistiques des différentes formes d'équation testées pour trouver le lien entre teneur en eau et permittivité.....	25
Tableau 2. Estimation des paramètres du modèle linéaire permettant de mettre en évidence l'effet de la zone sur la relation entre permittivité et teneur en eau.....	26
Tableau 3. Résultat d'une régression linéaire pour déterminer l'effet du traitement et de l'espèce sur la teneur en eau	37
Tableau 4. Paramètres de l'équation de régression de Van Genuchten pour les données Hyprop et WP4C	40
Tableau 5. Résultat d'un modèle linéaire pour déterminer l'effet du traitement et de l'espèce sur le pF issue des sondes FDR.....	43
Tableau 6. Résultat d'un modèle linéaire pour déterminer l'effet du traitement et du capteur sur le potentiel hydrique du sol et de la tige	47
Tableau 7. Formes d'équations pour prédire la conductance à partir de chaque variable de manière indépendante.....	53
Tableau 8. Paramètres du modèle multivarié prédisant la conductance stomatique pour les zones de hêtres.....	56
Tableau 9. Moyenne des accroissement terminaux et radiaux des semis de hêtres et de chênes pour l'année 2021 et 2022.	57

1. Introduction

Les forêts représentent un tiers des terres émergées et jouent un rôle important pour l'homme et son environnement par les très nombreux biens et services écosystémiques qu'elles prodiguent. Parmi ceux-ci, la forêt a un impact important sur le climat notamment comme puits de carbone, par l'effet de substitution des matériaux bois et par son impact sur le cycle de l'eau. Mais la forêt est également impactée par le climat et les changements de celui-ci causé par les émissions anthropiques de gaz à effet de serre. En Belgique, l'augmentation des températures et des événements extrêmes ainsi que la diminution des précipitations estivales attendues vont rendre les sécheresses et canicules plus courantes et sévères. Le stress hydrique, la prolifération de bioagresseurs, le déplacement des aires bioclimatiques, les feux et les tempêtes sont et seront tant de pressions sur les forêts d'aujourd'hui et de demain. La vitesse des changements et le temps de génération long des essences ligneuses posent question quant à une adaptation naturelle et montrent l'importance de la gestion pour la conservation des services (Chevassus-Au-Louis et Pirard, 2011 ; Choat et al, 2012 ; Van Ypersele et al, 2020).

Pour conserver les biens et services écosystémiques, il est crucial d'améliorer la résilience socio-écologique du système au centre duquel les forêts se trouvent. Pour cela, une approche consiste à s'intéresser à la résilience technique des forêts et des individus qui la composent. La complexité des forêts, par le nombre important d'agents, et du concept de résilience, par sa difficulté de caractérisation, rend une solution compliquée à cerner. Mais ce serait bien la complexité qui amène la résilience. Il est aujourd'hui admis que le nombre d'espèces et matériels génétiques, la redondance des fonctions et la connexion des espaces sont tant d'éléments qui conditionnent la résilience. Cela peut se traduire en forêt par l'essor des peuplements mélangés et irréguliers (Claessens et al, 2017 ; Holling, 1973 ; Nikinmaa et al, 2020)

Outre la complexité, la redondance et la connexion, s'intéresser à la régénération représente une porte d'entrée importante pour la stabilité des forêts. Même les plus grands arbres ont été des semis et comprendre leur croissance et leur sensibilité importante permet d'orienter le choix d'essences et d'itinéraires sylvicoles.

C'est dans cet objectif qu'est né le programme de recherche REGE+, mené par des professeurs et chercheurs de l'UCLouvain et de Gembloux. Le programme REGE+ vise à comprendre et simuler la croissance de la régénération au moyen d'un modèle individuel et spatialement explicite, HETEROFOR (HETEROgeneous FORest). Ce modèle mécaniste prend en compte l'utilisation des ressources (lumière, eau et nutriments) ainsi que des perturbations (abroustissement et tempêtes) pour simuler la croissance et représenter spatialement la dynamique de forêts complexes. Le module de stress hydrique des semis n'étant pas encore intégré dans le modèle, c'est dans ce cadre de recherche que s'inscrit ce mémoire.

L'eau circule depuis le sol jusqu'à l'atmosphère en passant à travers la plante selon un flux continu en cohésion. Les différences de potentiel hydrique, correspondant à la force avec laquelle les molécules d'eau sont retenues, créent un gradient se déplaçant du potentiel le plus grand vers le plus faible. L'atmosphère ayant un gradient beaucoup plus faible que les vaisseaux du xylème ou le sol, l'eau monte contre la gravité. Mais cette colonne d'eau peut être rompue en cas de gradient de potentiel trop fort caractérisé par une faible disponibilité en eau dans le sol et une forte demande évaporative de l'atmosphère. Pour éviter l'embolie des vaisseaux conducteurs, les arbres peuvent réguler la conductance stomatique pour augmenter la résistance du système. Mais une régulation stomatique entraîne une diminution d'entrée de CO₂ essentiel à la photosynthèse et mène donc à une perte de croissance. Les sécheresses et les vagues de chaleur causeraient donc une perte de croissance et un

risque de mortalité pour les arbres. C'est à partir de cadre théorique et cette hypothèse que se construit ce mémoire expérimental.

L'expérience réalisée pour ce mémoire a été menée en forêt sur des semis de hêtres commun et de chênes sessile pour tenter de caractériser leur statut hydrique et l'impact d'une sécheresse créée artificiellement par un dispositif de réduction des pluies captant 2/3 des précipitations. Pour cela, différentes mesures physiologiques, édaphiques et météorologiques ont été récoltées : la pluviométrie, le rayonnement, la température et l'humidité relative pour les mesures météorologiques, la teneur en eau et le potentiel hydrique pour les mesures du sol et le potentiel de la tige et des feuilles ainsi que la conductance stomatique pour les semis. Cette expérience tente de répondre à quatre questions de recherches pour lesquelles des hypothèses a priori ont été proposées :

- **Y a-t-il un impact du dispositif de réduction des pluies sur le statut hydrique du sol ?**

Il est attendu que le dispositif expérimental en place capte 2/3 des précipitations. Cela aurait un impact sur le statut hydrique du sol. La teneur en eau ainsi que le potentiel hydrique du sol devraient donc être plus faibles sous les toits que dans les traitements témoins.

- **Y a-t-il un impact du dispositif de réduction des pluies sur le statut hydrique des semis ?**

L'eau faisant partie d'un continuum sol-plante-atmosphère, une diminution du potentiel hydrique du sol dû au dispositif de réduction des pluies entraînerait une diminution du potentiel hydrique au sein des semis. Cette hypothèse a été largement explorée dans la littérature notamment par Breda en 1994 dans une étude sur les chênes sessiles et pédonculés.

- **Comment évolue la conductance stomatique selon la disponibilité et la demande en eau ?**

Due à une faible disponibilité en eau dans le sol et à la demande évaporative de l'atmosphère, la tension plus forte dans les semis entraînerait ceux-ci à diminuer leur conductance stomatique pour éviter une défaillance hydraulique. La relation entre le potentiel hydrique de feuille et conductance stomatique est notamment décrite chez McDowell et al (2008). La réponse stomatique de la plante au stress hydrique est variable selon l'espèce. Il est attendu que le chêne et le hêtre ne régulent que tardivement leur conductance et laissent donc s'installer des potentiels hydriques fort négatifs au sein de leur système conducteur. Ce sont des espèces considérées comme anisohydriques sur le spectre d'isohydricité.

- **Quel est l'impact du dispositif de réduction des pluies sur la croissance des semis ?**

Si les précédentes hypothèses s'avèrent correctes, il serait attendu pour cette dernière question que le dispositif de réduction des pluies diminue la croissance des semis. Une diminution de la disponibilité en eau et la fermeture des stomates entraîneraient une diminution d'entrée de CO² et de ce fait un arrêt de la photosynthèse (Damour, 2010).

Au-delà de l'effet du traitement, la comparaison de deux espèces majeures des forêts d'Europe est permise par cette expérience. Il est attendu que le chêne sessile résiste mieux au stress hydrique que le hêtre commun. On observerait donc une perte de croissance plus significative pour le hêtre que pour le chêne (Leuschner et al 2001).

Pour répondre aux questions de recherche, ce mémoire sera composé d'un état de l'art développant les enjeux et risques des changements climatiques sur la forêt, le concept de résilience et le fonctionnement hydraulique des arbres. Ensuite, une partie « Matériel et méthode » détaillera le contexte du bois de Lauzelle, le dispositif expérimental, les différentes variables mesurées et les méthodes d'analyse. Les résultats seront présentés et discutés dans la section suivante pour être ensuite synthétisés. Finalement, une conclusion basée sur les objectifs synthétisera le travail et proposera l'ouverture vers les prochaines questions de recherche.

2. Etat de l'art

2.1. Enjeux liés à la foresterie

2.1.1. Introduction

Il existe de nombreuses définitions de la forêt qui varie selon le type de forêts et la culture. Afin de collecter des statistiques forestières standardisées, l'Union Européenne s'est alignée sur la définition de la FAO, qui stipule que la forêt est constituée d'arbres ou arbustes dépassant 5 mètres, avec un couvert arboré supérieur à 10% et une superficie minimale de 0,5 hectare (FAO, 2020).

Au niveau européen, selon les données d'Eurostat (2021), les forêts couvrent une superficie totale de 1,04 milliard d'hectares. Cela représente 45% des terres émergées du continent. De grandes variations de superficies ont pu être observées au cours de la dernière décennie. La surface forestière européenne est descendue à environ 925 millions d'hectares en 1920. Cela peut s'expliquer par l'extensification agricole et la déforestation liées à l'augmentation démographique. Depuis ce pic, on observe une augmentation de ces surfaces en Europe. Cette augmentation peut être expliquée, entre autres, par la réduction des besoins en bois pour l'industrie, l'intensification agricole ainsi que la mise en place de politiques de reforestation (FAO, 2020).

Au niveau de la Wallonie, la surface boisée est de 563 000 ha en 2021, soit 33% du territoire wallon et est le socle de la filière bois qui représente plus de 18 000 emplois (Bays et al, 2021).

La forêt assure donc des rôles économiques, sociaux et environnementaux importants. Ces rôles peuvent être déclinés en services écosystémiques.

2.1.2. Services écosystémiques

Le concept de services écosystémiques permet de décrire les différents avantages que les humains tirent des écosystèmes. Les écosystèmes fournissent un large éventail de ressources et de fonctions qui constituent ces services (Chevassus-Au-Louis, 2012). Selon le Millenium Ecosystem Assesement de 2005, ils ont été divisés en quatre catégories : les services de soutien, les services d'approvisionnement, les services de régulation et les services culturels.

- Les services de soutien sont les processus de base des écosystèmes, notamment les cycles des nutriments, la formation des sols et la production primaire. Ces services soutiennent toutes les autres catégories de services et sont essentiels à la santé de l'écosystème (Chevassus-Au-Louis, 2011).
- Les services d'approvisionnement sont les produits obtenus à partir des écosystèmes, tels que la nourriture, l'eau douce, le bois, les fibres et l'énergie.
- Les services de régulation sont les avantages obtenus grâce à la régulation des processus de l'écosystème. Cela comprend la prévention des maladies, la purification de l'eau, la lutte contre les inondations et la régulation du climat.
- Les services culturels sont les avantages non matériels que les humains tirent des écosystèmes. Il s'agit de la valeur esthétique, des possibilités de loisirs et de tourisme, ainsi que des valeurs spirituelles et du patrimoine culturel.

Les forêts remplissent un très grand nombre des services précédemment cités. De la régulation des flux géochimiques, à la production de bois et de ressources non ligneuses en passant par son importance culturelle et spirituelle, ainsi que son rôle clef dans la régulation du climat.

En effet, la forêt a un impact important sur le climat. Les forêts mondiales servent de stock et de puits de carbone en séquestrant annuellement 2,6 milliards de tonnes de CO₂ de l'atmosphère, soit un tiers des émissions de l'homme, dans leur biomasse et les sols forestiers (IUCN, 2021). En réduisant la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, ce service de séquestration du carbone est essentiel pour lutter contre le changement climatique. En outre, le matériau bois est une substitution intéressante aux matériaux issus d'industries très couteuses en émissions, comme le béton ou l'acier (Leskinen et al, 2014). Finalement, les forêts régulent le cycle de l'eau, qui influence les conditions climatiques locales et régionales. En libérant de l'eau dans l'atmosphère par évapotranspiration, elles augmentent l'humidité locale ainsi que les précipitations et atténuent les températures extrêmes en fournissant de l'ombre et de la fraîcheur.

2.1.3. Menaces sur la stabilité des forêts

La forêt est également influencée par le climat et son évolution, tout en étant soumise à la pression anthropique, entraînant une pression sur la forêt et mettant en péril les services offerts. Par conséquent, la foresterie et la gestion des forêts doivent avoir pour objectif la durabilité et la résilience (Nikinmaa et al., 2020). Pour atteindre ces objectifs, une bonne connaissance des phénomènes en place à l'échelle du biome comme de l'arbre est nécessaire pour donner des itinéraires concrets à la gestion et pour restructurer en conséquence la filière dans son ensemble (Thom et Seidl, 2016).

2.2. Résilience des forêts

La résilience peut être définie comme la capacité d'un système à absorber et revenir à un état d'équilibre après une perturbation, tout en conservant sa composition taxonomique, ses structures, ses fonctions écosystémiques et ses flux régulés par divers processus (Holling, 1973). Une manière de l'exprimer est de la scinder en deux composantes : la résistance et la vitesse de récupération. La résistance est la capacité d'un système à absorber une perturbation sans subir de dégâts. La vitesse de récupération est la vitesse à laquelle le système retourne à un état stable (Bhaskar et al., 2018). Mesurer la résilience n'est pas évident et l'approche diffère selon l'indicateur utilisé. Il existe, en outre, trois concepts de résilience exprimés par Nikinmaa et al (2020) : la résilience d'ingénierie, la résilience écologique et la résilience socio-écologique.

- La résilience d'ingénierie est définie comme la capacité du système à revenir à son état initial et suppose donc qu'il n'y a qu'un seul état d'équilibre. La forêt resterait forêt avec une structure et composition similaire.
- La résilience écologique est la capacité du système à absorber une perturbation et de basculer dans un système différent du premier. Par exemple, une forêt peut se transformer en une prairie ou rester une forêt, mais avec une structure ou une composition différente de celle de départ.
- La résilience socio-écologique utilise un système élargi prenant en compte l'aspect humain et environnemental. Elle réfère donc à la capacité du système à s'adapter pour continuer de produire les services écosystémiques.

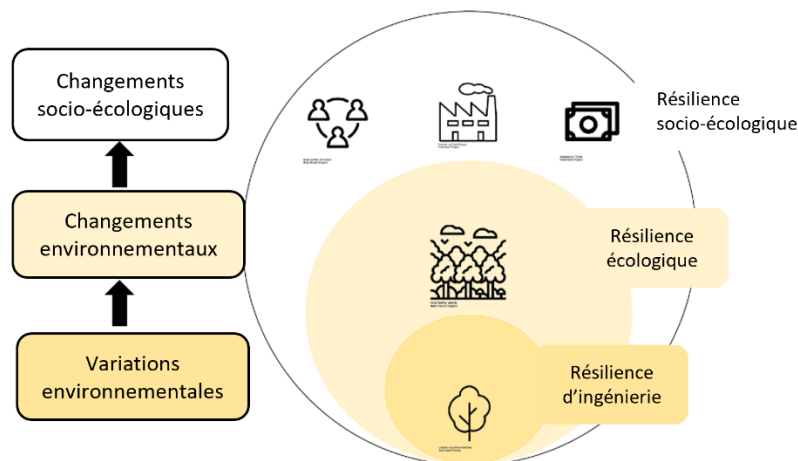


Figure 1. Les différents types de résiliences. Les cercles à droite représentent l'imbrication des différents concepts de résiliences. La partie gauche représente l'augmentation de la complexité du système étudié selon les différents concepts. Des variations environnementales renvoient à des variations restant dans l'éventail historique là où des changements environnementaux dépassent ceux-ci. Figure traduite de Nikinmaa et al, 2020.

La résilience d'ingénierie reflète les systèmes les moins complexes des trois et augmenter sa résilience revient, dans la plupart des cas, à augmenter celle des deux autres.

Pour augmenter la résilience des forêts, plusieurs stratégies peuvent être mises en œuvre. Cela peut passer par des peuplements irréguliers et mélangés, les bons choix d'essences, des itinéraires sylvicoles adaptés... En effet, la combinaison de traits fonctionnels différents améliore la résilience en produisant une large gamme de réponses potentielles aux divers stress (Régé+, 2023).

Le programme de recherche Régé+ vise à comprendre et pouvoir simuler la croissance de la régénération au moyen d'un modèle individuel et spatialement explicite, HETEROFOR, qui prend en compte l'utilisation des ressources (lumière, eau et nutriments). L'objectif étant de tester différentes options de gestions sylvicoles en prenant en compte l'abroussement par les ongulés ou encore certains impacts des changements climatiques. (Régé+, 2023)

Partir de la régénération est une approche intéressante, car les semis sont une étape de croissance très sensible aux perturbations environnementales (abroussement, sécheresse, excès d'eau ...) tout en représentant également la première étape vers les forêts de demain. La résilience des forêts de demain dépend des semis d'aujourd'hui.

2.3. Changements climatiques

Le changement climatique est un phénomène mondial qui entraîne des répercussions sur tous les aspects de notre environnement. Selon le rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2021), la température moyenne de la planète a augmenté de 1,2°C depuis l'ère préindustrielle, principalement en raison de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre dues aux activités humaines. Ce réchauffement climatique a entraîné une perturbation des flux atmosphériques et océaniques, provoquant une modification du régime des précipitations, une augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes, ainsi qu'une élévation du niveau de la mer.

En Belgique, et plus particulièrement en Wallonie, ces changements climatiques ont de grosses répercussions. Selon la lettre 18 de la plateforme Wallonne pour le GIEC (Van Ypersele et al, 2020), la

température moyenne en Wallonie a augmenté de 2,3°C au cours du siècle dernier, un rythme plus rapide que l'augmentation moyenne mondiale. Cette augmentation de la température a entraîné une augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur, avec des conséquences potentiellement graves pour les écosystèmes.

Le rapport indique en outre que les précipitations annuelles en Wallonie ont augmenté de 11 % au cours du siècle dernier. Cette augmentation n'est cependant pas constante tout au long de l'année. Les hivers sont devenus plus doux et humides, avec une augmentation des précipitations de 30 %, tandis que les étés sont devenus plus secs, avec une diminution des précipitations de 14 %. Ces changements dans le régime des précipitations sont principalement dus à la perturbation des flux atmosphériques provoquée par le réchauffement climatique.

Ces changements climatiques entraînent des conséquences au niveau environnemental et de la biodiversité avec une modification et un déplacement des aires climatiques entraînant l'apparition de pathogènes, la disparition d'espèces ou des phénomènes de migration. Comme énoncé dans le point 3.1 sur les services écosystémiques, les aspects socio-économiques sont étroitement liés à l'environnement et des impacts forts sont attendus sur l'agriculture, l'industrie, la santé, les ressources en eau et sur le système socio-économique dans son ensemble (Van Ypersele et al, 2021).

2.4. Impact des changements climatiques sur la forêt

De manière plus spécifique, l'augmentation des températures, les perturbations des précipitations et une fréquence plus élevée des événements extrêmes aura des impacts sur les forêts.

- Déplacement des aires bioclimatiques

L'aire de répartition des espèces d'arbres pourrait fortement évoluer et se déplacer vers le nord en Europe en réaction au réchauffement. D'ici 2100, le hêtre commun pourrait par exemple avoir une aire de distribution réduite de 50%. Une migration va et est en train de se faire, que ce soit de manière naturelle ou par la gestion sylvicole (Roman-Amat, 2007). La vitesse de migration imposée par les changements climatiques est très grande et il est difficile de prédire si les espèces forestières auront la capacité de se déplacer aussi rapidement (Bussotti, 2015). Ce sont probablement les essences à croissance rapide ayant des temps de génération courts ainsi que les essences avec de grandes amplitudes écologiques qui résisteront le mieux.

- Phénologie

La perturbation des saisons affectera la phénologie. Une saison de végétation plus longue entraîne un débourrement précoce et un jaunissement des feuilles tardif. Cela peut être positif pour la croissance, mais comporte également des risques en cas de gelées tardives ou de sécheresse estivale (Roman-Amat, 2007).

Non seulement la phénologie des arbres sera impactée, mais également celle des insectes. En effet les perturbations de températures entraînent un plus grand nombre de générations par an et ont une incidence sur la dynamique des populations d'insectes. Des insectes xylophages comme les scolytes (*Trypodendron* spp.) pourraient passer d'une à deux générations par an en Norvège. En Belgique, *Ips typographus* pourrait passer de deux à trois générations par an (Claessens et al, 2017). Les changements climatiques entraînent et vont continuer à entraîner des risques sanitaires par des conditions plus optimales pour des ravageurs.

- Feux de forêt

L'augmentation de la température et la sécheresse estivale entraînent une augmentation des risques de feux de forêt. En Europe, le nombre d'incendies a déjà augmenté de 20% en 30 ans et continuera d'augmenter (Orazio et al, 2014). La zone méditerranéenne est la plus touchée, mais le risque se propage dans toute l'Europe jusqu'à une latitude de 60°, soit équivalent à la hauteur d'Oslo en Suède (Orazio et al, 2014). Une augmentation des tempêtes est également prévue et entraîne des vents violents provoquant des chablis ainsi que des régimes de précipitations extrêmes.

- Croissance

Les changements climatiques impactent la croissance des arbres de manière complexe. Une augmentation de la croissance est attendue dans les régions où la température est le facteur limitant. L'allongement de la période de végétation et la stimulation de la photosynthèse par la plus grande disponibilité en CO₂ entraînent une augmentation de la croissance. Mais cela est vrai tant que d'autres éléments comme la disponibilité en azote ou en eau ne sont pas limitants (Roman-Amat, 2007). Sur le long terme, la production de biomasse devrait diminuer en Europe. Cela est dû à une productivité moins grande des espèces méridionales qui vont tendre à remonter avec les changements d'aires bioclimatiques ainsi qu'à l'effet du stress hydrique (Roman-Amat, 2007). Les changements climatiques vont entraîner une mortalité croissante et une réorganisation de la structure des forêts et de leur stockage de carbone (McDowell et Allen, 2015).

- Stress hydrique

La diminution des précipitations estivales et l'augmentation des températures entraînent un stress hydrique auprès des arbres, ce qui provoque une perte de croissance et une sensibilité aux différents effets du changement climatique précédemment cités. Mesurer le stress hydrique et comprendre les mécanismes physiologiques est donc essentiel pour juger de la capacité d'un arbre ou d'une forêt à persister malgré les changements climatiques (Bussotti, 2014 ; Choat 2012). Pour cela, il convient donc de bien comprendre le fonctionnement hydraulique des arbres.

2.5. Fonctionnement hydraulique des arbres

2.5.1. Continuum sol-plante-atmosphère

L'eau joue un rôle clef pour les arbres. Elle est essentielle pour le transport des nutriments depuis les racines jusqu'aux parties aériennes, est l'un des réactifs de la photosynthèse, tout en permettant de réguler la température de la feuille par évapotranspiration. L'eau se trouve dans le sol, l'arbre (ou de manière plus générale la plante) et l'atmosphère selon un continuum interconnecté caractérisé par des échanges dynamiques et de multiples interactions. Le moteur du mouvement de l'eau à travers ce continuum est l'évapotranspiration selon la théorie de tension-cohésion (Vincke, 2022).

2.5.1.1. Tension-cohésion

La théorie de tension-cohésion a été proposée en 1895 par Dixon et Joly et permet d'expliquer le transport de l'eau dans la plante sur des longues distances contre la gravité. Elle fait intervenir deux phénomènes physiques : une tension négative (ou succion), créée par l'évaporation d'eau au niveau des stomates, et une force de cohésion des liaisons hydrogène des molécules d'eau pour former une colonne d'eau avec les propriétés d'un fil solide à travers les vaisseaux conducteurs du xylème. L'évaporation d'eau au niveau des feuilles génère de proche en proche une tension dans toute la colonne. L'eau va donc circuler depuis le sol, le long de la plante, jusqu'à l'atmosphère le long d'un gradient de tension. Cette tension est exprimée par le potentiel hydrique (Cornic, 2008).

2.5.1.2. Le potentiel hydrique

Dans le domaine de la physiologie végétale, le potentiel hydrique de l'eau ψ_w (MPa) est défini comme l'énergie libre par unité de volume. Il représente la force avec laquelle la solution retient les molécules d'eau et permet de déterminer la direction de son mouvement. Le potentiel hydrique est une combinaison de plusieurs composantes qui peuvent s'écrire selon l'équation suivante (Gardner 1965) :

$$\psi_w = \psi_p + \psi_s + \psi_z \quad (Eq. 1)$$

où,

- ψ_w : Potentiel hydrique total (MPa),
- ψ_p : Potentiel de pression hydrostatique (MPa) : aussi appelé pression de turgescence (>0), il est dû à la présence de la paroi cellulaire qui résiste à la pression hydrostatique du milieu intracellulaire qui est comprise entre 3 et 8 bars,
- ψ_s : Potentiel osmotique (MPa) : correspond à l'inverse de la pression osmotique et est égale à 0 dans l'eau pure. En présence de solutés, l'énergie libre de l'eau diminue et ainsi le potentiel osmotique diminue,
- ψ_z : Potentiel gravitationnel (MPa) : dépend de la hauteur de l'arbre. À raison de -0,1 MPa par 10 mètres, cette composante peut être négligée dans le cas d'étude de semis,

La différence de potentiel hydrique entre deux points est le moteur du transfert d'eau. L'eau migre des potentiels les plus élevés vers les potentiels les plus faibles en suivant le chemin de moindre résistance hydraulique.

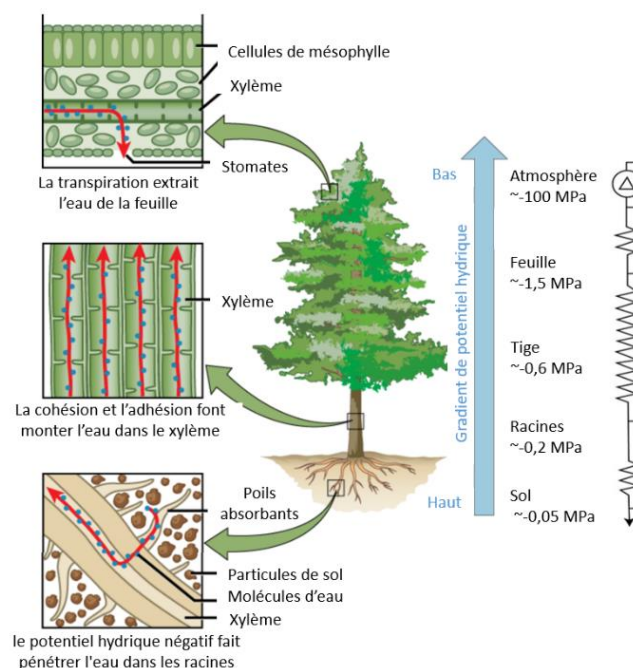


Figure 2. Schéma conceptuel du mouvement de l'eau le long du continuum sol-plante-atmosphère (Traduit et adapté de Ha et al, 2023)

2.5.1.3. Résistance hydraulique

La résistance hydraulique peut être expliquée selon l'analogie de la résistance électrique énoncée dans la loi d'Ohm :

$$R = \frac{U}{I} \quad (\text{Eq. 2})$$

La résistance électrique est fonction de la tension U (volt) aux bornes et de l'intensité I (ampères) du courant. Dans le cas du transport de l'eau, la tension correspondrait à la différence de potentiel hydrique ($\Delta\psi$), tandis que l'intensité correspond au flux d'eau transporté à travers le système. Comme pour un circuit électrique, le continuum sol-plante-atmosphère est constitué d'une somme de résistance à l'interface de chaque compartiment (sol-racine, racines, tige, tige-feuille, feuille-atmosphère ...). La résistance la plus importante, qui fait office de processus limitant du transport, se trouve au niveau des stomates (30%) (Sack et Holbrook, 2006). La résistance étant l'inverse de la conductance, la résistance au niveau des stomates est plus communément appelé la conductance stomatique.

2.5.1.4. La conductance stomatique

La conductance stomatique g_s (mmol/m²/s) est la mesure du flux de vapeur d'eau sortant des stomates d'une feuille. Les stomates sont un important lieu d'échange gazeux entre la plante et l'environnement. Ils permettent l'entrée du CO₂, essentiel à la photosynthèse, et la sortie de vapeur d'eau permettant de diminuer le potentiel hydrique de la feuille. Le ratio entre l'assimilation photosynthétique et l'utilisation d'eau peut être défini comme le « Water use efficiency » (Lin et al, 2018). Les échanges gazeux sont régulés par l'état de turgescence des cellules de garde qui composent les stomates. Différentes hormones (ex acide abscissique) permettent de modifier l'état des cellules de gardes au moyen d'une pompe à protons K⁺ pour créer un gradient électrochimique. Ces hormones sont activées grâce à des capteurs sensibles à la lumière, la température, l'humidité de l'air et l'état hydrique du sol. En effet, ce sont des facteurs environnementaux qui déterminent l'ouverture des stomates (Damour, 2010 ; Cornic, 2008).

La transpiration sortant des stomates peut être définie comme suit (Martin-StPaul et al, 2017) :

$$E = g_s \times \frac{VPD}{P_{atm}} = k \times (\psi_{sol} - \psi_{feuille}) \quad (\text{Eq. 3})$$

où,

- E est la transpiration [mmol/m²/s]
- g_s est la conductance stomatique [mmol/m²/s]
- VPD est le déficit de pression vapeur [kPa]
- P_{atm} est la pression atmosphérique [kPa]
- k est la conductance de la plante [mmol/m²/s]
- ψ_{sol} et $\psi_{feuille}$ sont les potentiels hydriques du sol et de la feuille [kPa]

L'égalité de cette équation est correcte tant que les conditions sont non limitantes en eau.

2.5.2. Impact du manque d'eau

2.5.2.1. Le stress hydrique

Le point 3.5.1. faisait état du fonctionnement normal du continuum quand les conditions environnementales étaient suffisantes. Le manque d'eau est une contrainte environnementale

majeure qui va affecter la croissance et la survie des arbres. Le manque d'eau ou « stress hydrique » peut être scindé en deux composantes : le stress hydrique du sol quand celui-ci présente de faibles disponibilités en eau et le stress hydrique atmosphérique qui est dû à une demande évaporative élevée (Damour, 2010 ; Sperry et al, 2015).

Le stress hydrique atmosphérique représente la demande évaporative de l'air. L'augmentation de la température, la diminution de l'humidité ou des vents forts sont des paramètres qui vont diminuer le potentiel hydrique de l'atmosphère et donc renforcer le gradient de potentiel au sein du système sol-plante-atmosphère (Saliendra *et al.*, 1995). La demande évaporative peut être calculée comme le déficit de pression vapeur de l'air selon cette équation (de Wergifosse et al, 2020) :

$$VPD = e_s(T) - e_r \quad (Eq. 4)$$

où

- VPD est le déficit de pression vapeur [kPa]
- $e_s(T)$ est la pression de vapeur saturante [kPa] et est défini de manière empirique comme :

$$e_s(T) = 610,78 \times e^{\left(17,2694 \times \frac{T}{T+237,3}\right)} \quad (Eq. 5)$$

- T est la température [°C]
- e_r est la pression vapeur de l'air [kPa] défini comme :

$$e_r = \frac{Rh}{10^4} e_s(T_r) \quad (Eq. 6)$$

- Rh est l'humidité relative en %

Pour être plus proche de la demande évaporative ressentie par la plante, le déficit de pression vapeur de la feuille peut être calculé selon l'équation suivante :

$$VPD_l = e_s(T_l) - e_s(T) \times \frac{Rh}{100} \quad (Eq. 7)$$

où

- VPD_l est le déficit de pression vapeur de la feuille [kPa]
- T_l est la température de la feuille [°C]

Le stress hydrique du sol est induit et renforcé par un manque de précipitation, une forte demande évaporative ou un sol avec une faible capacité de rétention. La teneur en eau du sol [m³/m³] représente la quantité d'eau dans le sol, mais ne représente pas réellement l'eau disponible pour la plante. C'est pourquoi la mesure de potentiel hydrique du sol [MPa], qui s'affranchit de la texture et de la structure, est préférée pour déterminer l'état de stress hydrique de la plante lié au sol (Damour, 2010).

2.5.2.2. Effet du stress hydrique

L'augmentation de la demande évaporative et la diminution de l'eau disponible dans le sol auront pour effet de renforcer le gradient de potentiel au sein de la plante. Si la tension de la colonne d'eau au sein du xylème dépasse la force de cohésion de celle-ci, il apparaît des bulles de vapeur dans le xylème. Ce phénomène est appelé la cavitation et a pour effet de diminuer la conductivité. Ces bulles d'airs et leur propagation peuvent entraîner l'embolie, caractérisée par la rupture de la colonne d'eau empêchant

donc l'acheminement de celle-ci vers les sites de photosynthèse. La phase vapeur se propage alors à travers les ponctuations dans tous les vaisseaux (Choat et al, 2012 ; McDowell et al, 2008). Lorsqu'une partie importante des vaisseaux est embolisée, le phénomène s'intensifie dû à la répartition de la tension sur un nombre plus restreint de vaisseaux selon une boucle de rétroaction appelée « runaway embolism » (Sperry et Love, 2015). Le pourcentage de perte hydraulique nécessaire pour entraîner la mort de l'arbre est variable selon les essences et est en moyenne de 88% chez les angiospermes (Adams et al, 2017).

Comme énoncé au point 3.5.1.4., la capacité à fermer les stomates pour diminuer la conductance stomatique représente une régulation importante pour augmenter la résistance hydraulique dans la plante et retarder l'apparition d'embolie. En effet, comme le montre l'équation 3, diminuer la conductance stomatique réduit $\Delta\psi$ en évitant la diminution de potentiel de la feuille (Martin-StPaul, 2017). Malgré des stomates fermés, il est possible que le potentiel hydrique continue tout de même de diminuer à cause des pertes résiduelles au travers de la cuticule des feuilles.

Réduire la conductance stomatique impacte également l'entrée de CO₂ essentiel à la photosynthèse. Une faible assimilation sur une longue durée entraîne une famine carbonée, un épuisement des réserves et une sensibilité accrue aux perturbations environnementales et biologiques (McDowell et al, 2008).

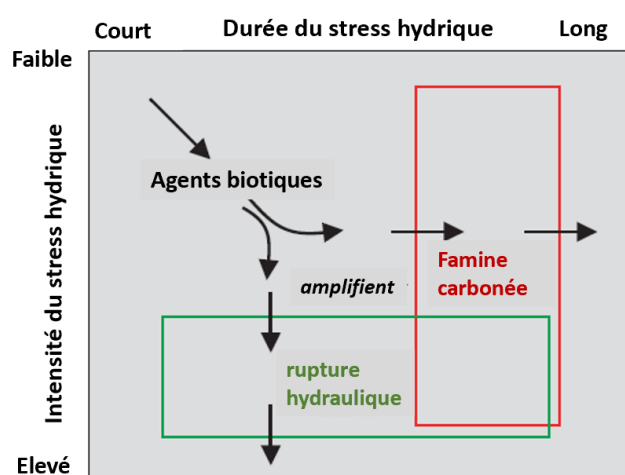


Figure 3. Schéma conceptuel des principaux processus physiques de mortalité des arbres selon la durée et l'intensité de sécheresses. Les attaques par des agents biotiques peuvent amplifier ou être amplifiés par l'un ou l'autre phénomène. (Traduit de McDowell et al., 2008)

L'arbre en période de sécheresse est donc dans un compromis entre la famine et la rupture hydraulique. Selon l'espèce et l'environnement, les plantes se positionnent différemment dans ce compromis et peuvent être classées binaires selon deux comportements extrêmes (parfois contestés pour cette raison ; Hochberg, 2017): isohydrique et anisohydrique. Les espèces dites « anisohydrique » peuvent maintenir plus longtemps leur assimilation carbonée en période de sécheresse en régulant peu leur transpiration. Elles sont plus résistantes à la diminution du potentiel hydrique et à la propagation d'embolie. Les espèces « isohydriques », à l'inverse, régulent fortement leur transpiration par la fermeture des stomates et conservent ainsi une certaine homéostasie de leur potentiel pour éviter les ruptures hydrauliques (McDowell et al., 2008).

Outre les comportements de régulation de la transpiration par les stomates, il existe toute une série de comportements et de traits fonctionnels liés à la résistance au manque d'eau. En effet, les angiospermes et gymnospermes peuvent être placées sur un continuum selon un indicateur de

résistance à l'embolie ψ_{50} (potentiel hydrique à partir duquel 50% des vaisseaux sont embolisés) (Martin-StPaul, 2017). La structure du xylème, son diamètre selon la hauteur, le type racinaire et sa profondeur, le « water use efficiency » (WUE), le stockage interne d'eau et la réduction de surface foliaire durant les périodes estivales sont tant d'adaptations parmi d'autres conférant une meilleure résistance à la sécheresse (Choat et al 2012 ; Lin et al, 2015). Certains de ces mécanismes sont bien compris, tandis que d'autres, comme la segmentation hydraulique, le rôle de la capacitance dans la plante, l'impact de la transpiration cuticulaire et les températures critiques, ne le sont pas encore et doivent être étudiés dans le but de modéliser la mortalité liée à la sécheresse (Martin-StPaul, 2017).

De manière générale, les espèces ont tendance à opérer proche de leurs limites fonctionnelles et sont donc exposées à une rupture hydraulique en cas de précipitations anormalement basses combinées à une vague de chaleur, et ce, indépendamment du biome. La convergence évolutive vers cette stratégie risquée pourrait être expliquée par le compromis entre la croissance et le risque de mortalité. Ainsi, une espèce ayant une faible marge de sécurité tire pleinement profit de la gamme de pression qui se trouve dans la tolérance de son système hydraulique et lui confère donc une bonne compétitivité (Choat et al, 2012).

Cette sélection naturelle opérée sur de nombreuses générations à cycles longs, menant à des traits risqués face au stress hydrique, mais très compétitifs, pose question face à la vitesse des changements climatiques en cours (Choat et al, 2012).

2.6. Le Hêtre et le Chêne face aux changements climatiques

Le hêtre (*Fagus sylvatica*, Liebl., 1753) et le chêne sessile (*Quercus petraea*, Liebl., 1784) sont deux essences indigènes d'Europe avec une large amplitude écologique et sont parmi les angiospermes les plus représentés en Belgique. Ce sont tous deux des espèces climaciques dans la succession écologique tout en différant par leurs besoins et leur sensibilité.

Le hêtre est une essence sciaphile avec une croissance soutenue et un enracinement oblique relativement peu profond. Sa régénération est aisée et peu appétée par la faune sauvage, mais est très sensible aux gelées tardives. À tout stade de croissance, le hêtre est également très sensible aux sécheresses et canicules printanières et estivales. Sa sensibilité au stress hydrique, renforcée par son enracinement profond, en fait une espèce à risque face aux changements climatiques (Petit, 2017).

Le chêne sessile, quant à lui, est une essence héliophile avec une croissance plus lente, ainsi qu'un enracinement pivotant et plus profond. Sa régénération est plus compliquée à cause de glandées irrégulières, de sa forte appétence par les ongulés et de la fragilité des semis aux gelées. En revanche, le chêne sessile est mieux équipé pour résister aux stress hydriques notamment grâce à son enracinement profond qui lui confère une stabilité face aux phénomènes climatiques extrêmes tels que les tempêtes. Sa plasticité écologique et sa résistance au manque d'eau en font une espèce capable de pousser dans des milieux contraignants et constitue naturellement l'essence de remplacement du hêtre dans ces milieux (Petit, 2017).

3. Matériel et méthodes

3.1. Site d'étude

Ce mémoire a été réalisé dans le bois de Lauzelle, situé en Belgique dans la province du Brabant Wallon. D'une superficie de 203ha, Le bois de Lauzelle se trouve dans la zone bioclimatique des plaines et vallées Scaldisiennes qui a un climat tempéré océanique influencé par le Gulf Stream. Elle a un relief assez vallonné et le sol repose principalement sur des sables bruxelliens. Le bois de Lauzelle est classé comme un site de grand intérêt biologique et abrite une grande diversité d'essences avec une majorité de feuillus (70%) parmi lesquels les hêtres et les chênes sessiles et pédonculés sont les plus représentés (SPW, 2023 ; UCLouvain, 2023). Depuis 1994 elle fait partie du réseau Natura 2000 et a obtenu le label PEFC de gestion durable en 2021 confortant la vision multifonctionnelle du plan d'aménagement (UCLouvain, 2023).

Le bois de Lauzelle est géré conjointement par l'Administration du patrimoine immobilier et des infrastructures (ADPI/GPEX) avec l'appui scientifique et stratégique de l'équipe forestière du Earth and Life Institute et de la faculté des bioingénieurs de l'UCLouvain (ELIe/AGRO). Outre les objectifs environnementaux, économiques et sociaux, le bois de Lauzelle remplit un rôle d'enseignement et de recherche. C'est dans ce cadre que des dispositifs expérimentaux ont été mis en place pour étudier l'impact du stress hydrique sur des semis. Ce sont les données récoltées expérimentalement dans ces dispositifs qui sont analysées et utilisées dans ce mémoire.

3.2. Dispositif expérimental

Pour répondre aux objectifs fixés par le projet Rege+, trois zones de régénération naturelle de hêtre (HE1, HE2, HE3) et trois zones de régénération naturelle de chêne (CH1, CH2, CH3) ont été sélectionnées dans le bois de Lauzelle.

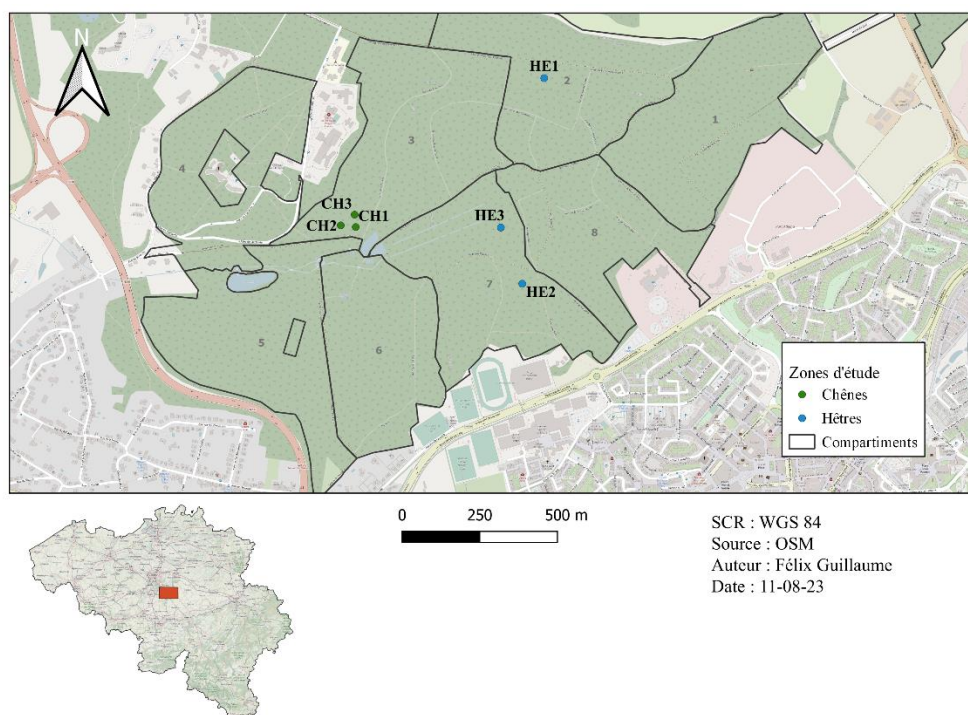


Figure 4. Situation géographique des zones d'étude

Chaque zone est composée de deux traitements. Le premier traitement concerne une « réduction des pluies ». Il a été appliqué sur une surface horizontale de 4x4m et est couvert d'un toit partiel fait de rigoles en plastique transparentes captant 2/3 des précipitations. Le suivi et les mesures se font dans un carré de 2x2m au centre du toit pour éviter une pluie latérale. De plus, une bâche plastique a également été installée verticalement sur 40cm de profondeur tout autour de la zone pour éviter les transferts latéraux d'eau dans le sol. Le second traitement est un traitement témoin de 2x2m. Les deux unités de traitement sont entourées d'un grillage pour éviter des perturbations (e.g. vandalisme, gibier).

Ce dispositif expérimental est en place depuis mars 2021

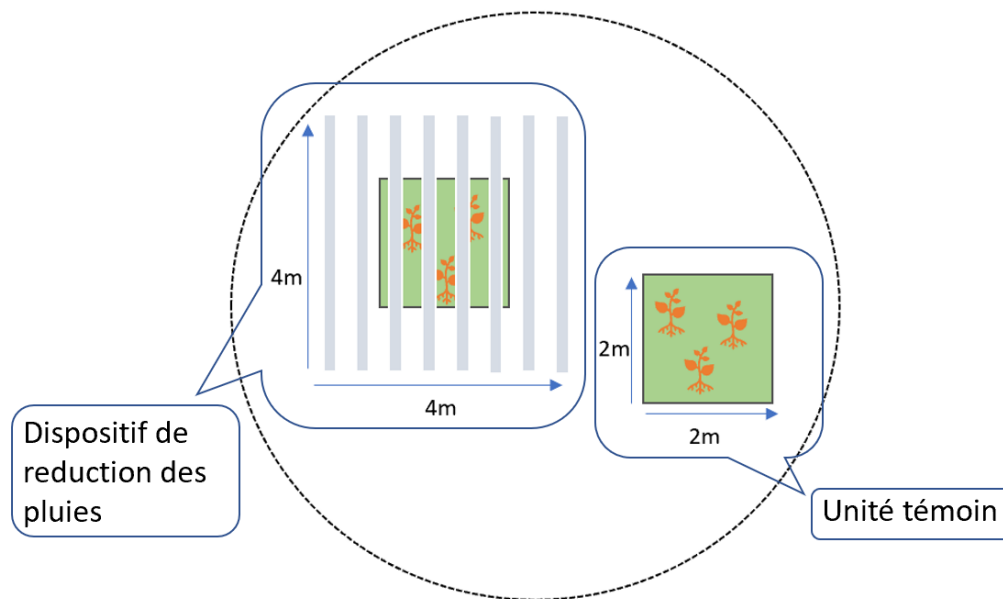


Figure 5. Représentation schématique du dispositif expérimental



Figure 6. Photo du dispositif de réduction des pluies (Rege+ : <https://www.regeplus.be/>, 2023)

3.3. Capteurs et types de mesures

Les mesures réalisées pour ce mémoire peuvent être réparties en quatre catégories :

- Conditions météorologiques
- Statut hydrique du sol
- Statut hydrique des semis
- Croissance des semis

3.3.1. Conditions météorologiques

3.3.1.1. *Température de l'air, précipitation et humidité relative*

Connaitre les températures, les précipitations et l'humidité relative observées durant la période d'étude est important dans le but de déterminer la demande évaporative de l'atmosphère et de caractériser les précipitations. Pour ce faire, ce mémoire utilise les données récoltées à la station météorologique de Louvain-la-Neuve par le réseau Pamseb appartenant au centre wallon de recherche agronomique (CRA-W/Agromet.be). Les données fournies s'étendent de 1999 à 2022 avec un pas de temps d'une heure.

3.3.1.2. *Photos hémisphériques*

Pour compléter les données météorologiques, des photos hémisphériques ont été réalisées dans les six zones avec pour objectif de déterminer la proportion de rayonnement transmis. Les photos ont été réalisées dans chaque unité de traitement en juillet 2022 avec des conditions considérées optimales pour maximiser le contraste entre le ciel et la canopée. Elles ont ensuite été analysées au moyen du logiciel Gap Light Analyzer pour en déterminer les proportions.

3.3.1.3. *Rayonnement photosynthétique actif – Capteurs PAR*

pour compléter les données de radiation, il est intéressant d'étudier le rayonnement photosynthétique actif réellement perçu par les semis dans la zone témoin et sous le toit à l'aide de capteurs PAR. Ces capteurs PAR ont été installés uniquement dans la zone de hêtres HE3 qui, comme il est décrit plus bas, bénéficie d'un suivi plus complet de mesures physiques et physiologiques.

Les capteurs PAR mesurent la densité du flux de photons (PPFD) en $\mu\text{mol/s/m}^2$ dans la plage de longueur d'onde de 400 à 700nm. Cette plage correspond aux longueurs d'onde utilisées par les organismes photosynthétiques pour réaliser leur photosynthèse. Ces mesures ont aussi permis de quantifier de manière indirecte la demande évaporative de l'atmosphère à laquelle étaient soumis les semis.

Huit sondes PAR, dont une parie a été fabriquée par Skye Instruments et une autre faite maison ont été installées dans la zone HE3, à hauteur des semis, avec une répartition de quatre sondes par unité de traitement. Ces sondes ont produit des mesures avec un pas de temps de dix minutes entre le 15 juillet et le 10 novembre.

La calibration avait été réalisée préalablement à l'installation en laissant tous les capteurs sous une même lumière avec un capteur de référence pour appliquer un coefficient de correction propre à chaque capteur.

3.3.2. Statut hydrique du sol

3.3.2.1. *Teneur en eau – sondes FDR*

La teneur en eau du sol est un des paramètres importants pour comprendre et justifier un assèchement. Avoir un suivi temporel de celui-ci, dans chaque zone et traitement, permet de suivre

son évolution sur des saisons et des régimes de précipitations différents. La teneur en eau permettra également, couplée avec des mesures de potentiel hydrique du sol, de réaliser des courbes de rétentions propres à chaque zone. L'équation de ces courbes servira à obtenir le potentiel hydrique à partir des teneurs en eau et pourra être mis en lien avec des mesures physiologiques de potentiel hydrique des semis.

Les sondes utilisées sont des modèles CS615 et CS616 fabriquées par Campbell Scientific et sont basées sur la réflectométrie à domaine temporel (FDR). Elles consistent en un émetteur, qui envoie une impulsion électrique dans le sol le long de deux guides d'onde, et d'un récepteur qui mesure la fréquence du signal réfléchi. Ce signal est influencé en grande partie par la teneur en eau, mais également par la température et d'autres paramètres physico-chimiques du sol (Campbell Scientific, 2020 ; De Vos, 2021).

Vingt-quatre sondes CS615 et CS616, 4 par zone et 2 par traitement, étaient disponibles et déjà en place pour réaliser l'expérience. Elles sont enfoncées verticalement depuis la surface du sol jusqu'à une profondeur de 30cm et fournissent une mesure toutes les heures. Les sondes sont alimentées par batterie via un datalogger qui sauvegarde les données. L'installation des sondes a eu lieu en juin 2021 et elles sont encore actives aujourd'hui.

Pour obtenir des résultats, il est important de réaliser une double calibration. La première est spécifique à la sonde et la seconde aux caractéristiques du sol.

La première calibration se réalise en amont de l'installation et a pour objectif de déterminer les paramètres de l'équation suivante pour obtenir une permittivité à partir d'une fréquence. Cela a été réalisé par des mesures dans plusieurs milieux dont la permittivité est connue comme l'eau, l'air, l'éthanol et le méthanol.

$$\sqrt{\varepsilon} = c_0 + c_1 \times \frac{1}{f} \quad (Eq. 8)$$

où

- ε est la permittivité (F/m)
- f est la fréquence (Hz)

La deuxième calibration concerne le sol et a pour objectif d'obtenir des teneurs en eau à partir de la permittivité. Différentes équations faisant le lien entre la permittivité et la teneur en eau ont été obtenues de manière empirique par Topp en 1980 ou encore Ferré en 1996 (Mukhlisin et Saputra, 2013)

La nature du sol influence fortement le lien entre la permittivité et la teneur en eau. En effet, un sol argileux, par exemple, a une permittivité plus élevée qu'un sol sableux à teneur en eau égale, car les minéraux argileux ont une plus grande capacité à stocker les charges électriques. C'est pourquoi il est important d'utiliser une équation d'étalonnage adaptée au site d'étude.

Pour réaliser l'étalonnage des sondes FDR, des échantillons de sol ont été prélevés à proximité des unités « témoin » dans chacune des six zones à sept reprises entre le 01/07/2022 et le 23/02/2023 avec à chaque fois trois répétitions par zone. La première fois, l'échantillonnage a été réalisé à l'aide de Kopecki de volume connu pour déterminer la masse volumique du sol (supposées invariantes sur la durée de l'expérience) pour les différentes zones.

Cette masse volumique a été déterminée selon l'équation :

$$\rho_s = \frac{M_s}{V} \quad (Eq. 9)$$

où

- ρ_s est la masse volumique du sol [g/cm³]
- M_s est la masse sèche du sol [g]
- V est le volume du Kopecki [cm³]

Les six autres échantillonnages ont été réalisés à l'aide d'une tarière.

Ces échantillons de sol ont été pesés, séchés et ensuite repesés. Cela a permis de déterminer la teneur en eau massique des différents échantillons qui sera ensuite transformée en teneur en eau volumique sur base de la densité apparente de chaque zone selon l'équation :

$$\theta = \frac{(M_h - M_s)}{M_s} \times \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (Eq. 10)$$

où

- θ est la teneur en eau volumique [m³/m³]
- M_h est la masse humide du sol [g]
- ρ_w est la masse volumique de l'eau [g/cm³]

Ces teneurs en eau issues des échantillons de sol seront considérées comme la référence qui permettra la calibration des sondes FDR. La calibration consistera donc à trouver la relation entre la permittivité des FDR et la teneur en eau des échantillons qui minimise la somme des carrés des écarts.

Différentes formes d'équations bivariées ont été testés :

$$\theta = c_0 + \varepsilon \times c_1 \quad (Eq. 11)$$

$$\theta = c_0 + \varepsilon \times c_1 + \varepsilon^2 \times c_2 + \varepsilon^3 \times c_3 \quad (Eq. 12)$$

$$\theta = c_0 + \sqrt{\varepsilon} \times c_1 \quad (Eq. 13)$$

$$\theta = c_0 + \ln(\varepsilon) c_1 \quad (Eq. 14)$$

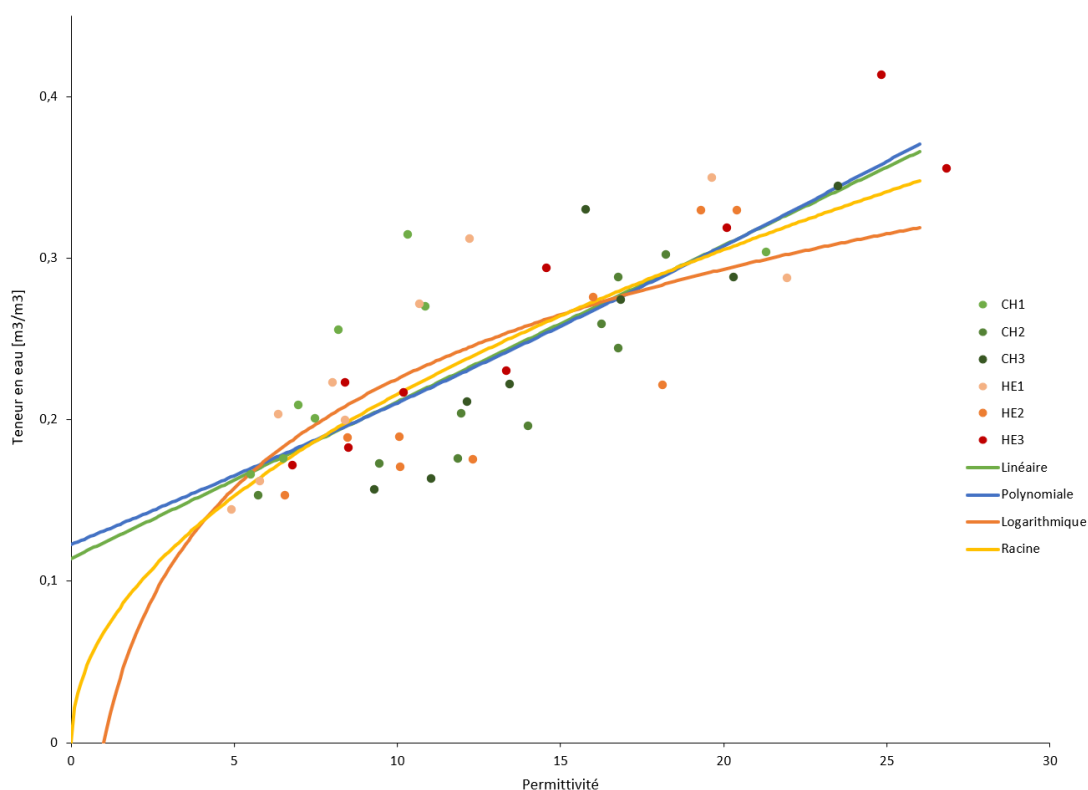


Figure 7. Comparaison de différentes formes d'équation pour prédire au mieux la relation entre la permittivité et la teneur en eau. Les teneurs en eau (m^3/m^3) observées ont été obtenues à partir des mesures gravimétriques alors que les données de permittivité proviennent des sondes FDR. Les données de permittivité sont des moyennes des valeurs fournies par les différentes sondes FDR d'une même zone pour les journées durant lesquelles les échantillons de sol ont été prélevés.

Tableau 1. Paramètres et statistiques des différentes formes d'équation testées pour trouver le lien entre teneur en eau et permittivité.

	LINÉAIRE (Eq.11)	POLYNOMIALE (Eq.12)	RACINE (Eq.13)	LOGARITHMIQUE (Eq.14)
c_0	0,11	0,12	0	0
c_1	0,0097	4,81E-05	0,068	0,098
c_2		8,29E-03		
c_3		0		
SCE	0,0051	0,0051	0,0054	0,0070
R^2	0,68	0,68	0,67	0,65
STD ERROR	0,031	0,031	0,031	0,026

Après optimisation des paramètres et d'après le coefficient de détermination et l'erreur standard, l'équation linéaire semble la plus indiquée pour appliquer la calibration aux données issues de la sonde CS616.

Un test statistique a été réalisé pour évaluer l'effet de la zone sur la relation entre permittivité et teneur en eau.

Tableau 2. Résultats d'un modèle linéaire permettant de mettre en évidence l'effet de la zone sur la relation entre permittivité et teneur en eau (Teneur en eau (m3/m3) ~ Permittivité * Zone)

	P VALEUR
PERMITTIVITÉ	3,24e-14***
ZONE	0,007**
PERMITTIVITÉ*ZONE	0,77

L'analyse statistique montre que la permittivité et la zone ont des effets significatifs sur la teneur en eau. En développant plus ce tableau, seules deux zones semblent avoir une teneur en eau légèrement significativement différente. Il a donc été décidé de n'utiliser qu'une seule équation pour toutes les zones.

L'équation $\theta = 0,114093 + \varepsilon \times 0,009686$ va donc être utilisée pour appliquer la nouvelle calibration aux teneurs en eau des sondes FDR pour toutes les zones.

3.3.2.2. Potentiel hydrique du sol – Sondes TEROS

La teneur en eau du sol est une mesure intéressante pour mesurer la quantité d'eau dans le sol, mais ne renseigne pas sur la disponibilité de celle-ci pour les plantes. En revanche, le potentiel hydrique du sol reflète la force avec laquelle l'eau est retenue dans le sol et la facilité avec laquelle les plantes peuvent extraire celle-ci. Le potentiel hydrique est dès lors un paramètre important pour mesurer le stress hydrique.

Les tensiomètres sont des instruments de mesure couramment utilisés pour mesurer directement le potentiel hydrique du sol. Pour cette expérience, des TEROS21 du groupe METER ont été utilisés. Les têtes des capteurs sont composées de deux disques en céramique qui sont en équilibre avec le sol et donc au même potentiel que celui-ci. Pour déterminer la teneur en eau du disque en céramique, la sonde mesure la conductivité électrique du matériau et convertit cette teneur en potentiel en utilisant une courbe caractéristique du matériau. Le potentiel mesuré est le potentiel matriciel, qui est la composante principale du potentiel dans les sols. Les sondes sont également capables de mesurer la température du milieu (METER group, 2020).

Le potentiel hydrique du sol ψ est mesuré en MPa et est converti de façon logarithmique en pF selon la relation suivante.

$$pF = \log_{10}\left(\frac{\psi}{-9,787 \times 10^{-5}}\right) \quad (Eq. 15)$$

où,

- pF est le potentiel de Fuchs [-]
- ψ est le potentiel hydrique [MPa]

Six sondes TEROS 21 étaient disponibles et ont été installées fin juin 2022 avec l'aide de Sébastien François et Frédéric André dans la zone HE3 de hêtres. Les sondes ont été réparties entre les deux traitements et installées à une profondeur de 15cm. Les trois sondes de chaque traitement sont reliées vers une même batterie et un même datalogger qui stocke les informations avec un pas de temps d'une heure. Régulièrement, les batteries ont dû être changées et rechargées et les données sauvegardées.

3.3.2.3. *Potentiel hydrique du sol - WP4C*

Pour compléter les mesures de potentiel hydrique récoltées dans la zone HE3 par les tensiomètres TEROS21, des échantillons de terre provenant de chaque zone ont été passés dans l'instrument WP4C.

Le WP4C, développé par le groupe METER, est un appareil de mesure du potentiel hydrique des échantillons de sol. Il utilise un capteur de point de rosée pour mesurer conjointement le potentiel matriciel et osmotique. Contrairement à certains capteurs qui mesurent des paramètres secondaires corrélés au potentiel hydrique, le capteur de point de rosée est une mesure primaire.

Le WP4C fonctionne en déterminant l'humidité relative de l'air au-dessus de l'échantillon dans une chambre scellée. Une fois que l'échantillon est en équilibre avec la vapeur, l'humidité relative est déterminée en utilisant la méthode du miroir réfrigéré. Cette méthode consiste à refroidir un petit miroir jusqu'à ce que de la rosée commence à se former. Le point de rosée est alors enregistré et converti en potentiel hydrique. (METER group, 2023)

La précision de la mesure de la température du point de rosée est de 0,001 °C ce qui permet une très bonne précision de $\pm 1\%$ pour des valeurs de potentiel allant de -5 MPa à -300 MPa. Mais les instruments de pression de vapeur, comme le WP4C, sont limités par la précision dans l'extrémité humide de la gamme de potentiel hydrique. La différence de température entre la pression de vapeur saturée et la pression de vapeur à l'intérieur de la chambre à échantillon devient extrêmement faible. Entre 0 à -5 MPa, le WP4C a une précision de $\pm 0,05$ MPa. Ce qui représente une précision de $\pm 50\%$ pour une mesure de -0,1 MPa. (TMS lab, 2023)

L'échantillonnage de sol pour le WP4C s'est fait à partir des échantillons de sol récoltés pour calibrer les sondes FDR comme mentionné plus haut. Sept campagnes d'échantillonnage de sol sur 30cm de profondeur à l'aide d'une tarière dans chacune des six zones avec trois répétitions par zone ont été réalisées au cours de l'été, automne et hiver 2022. Pour chacun de ces échantillons, trois sous-échantillons ont été utilisés pour le WP4C. Ces sous-échantillons ont été mesurés à l'aide du mode précis du WP4C, ce qui a permis d'obtenir un potentiel hydrique, un pF et une température.

3.3.2.4. *Potentiel hydrique du sol – HYPROP*

Un troisième jeu de données de potentiel hydrique et de teneur en eau a été obtenu pour chaque zone par le dispositif HYPROP. HYPROP est un instrument de laboratoire qui génère une courbe de rétention en eau pour un échantillon de sol. Cet instrument se base sur une méthode évaporatoire d'échantillons saturés en eau en mesurant simultanément et de manière continue le poids à l'aide d'une balance et le potentiel hydrique à l'aide de deux tensiomètres d'une grande précision. Les données HYPROP couvrent une gamme humide de potentiel et peuvent être complétées par le WP4C dans les gammes sèches pour produire un profil complet de courbe de rétention.

Pour réaliser ces mesures, trois échantillons de sol ont été récoltés par zone de hêtres. Les zones de chênes étant spatialement très proches, le profil de sol a été supposé semblable et uniquement trois échantillons ont été récoltés pour ces zones.

Après installation, les résultats ont été traités sur Rstudio par Gilles Tilman pour produire des courbes de rétention et pour faire correspondre l'équation de Van Genuchten. Cette partie sera plus amplement expliquée et discutée dans la partie 4.2.2.

3.3.3. Statut hydrique des semis

3.3.3.1. *Potentiel hydrique de la tige – Capteur PSY1*

Pour compléter les mesures de potentiel hydrique du sol prises en continu par les tensiomètres dans la zone HE3, des sondes psychrométriques mesurant le potentiel hydrique des tiges des semis ont été également installées pour avoir le potentiel en différents points du continuum sol-plante-atmosphère.

Les sondes psychrométriques utilisés sont les PSY1 de la firme ICT International. Elles mesurent la pression de vapeur dans la chambre reliée au tissu conducteur d'eau de la plante, en se basant sur l'équilibre de pression de vapeur entre la phase liquide de la sève et la chambre. Le capteur utilise une technologie de refroidissement (refroidissement de Peltier) pour diminuer la température et faire saturer l'air. Cette dépression est corrigée selon le gradient de température entre le tissu et la jonction de mesure pour ensuite être converti en potentiel hydrique selon une droite d'étalonnage (ICT International, 2019). La sonde PSY1 permet de mesurer le potentiel hydrique avec une précision élevée sur une plage entre -0,01 MPa à -10 MPa. Un grand soin est nécessaire dans la manipulation, la calibration et l'installation de la sonde pour obtenir des résultats cohérents. Préalablement à l'installation, il a fallu vérifier l'état de fonctionnement des sondes PSY1, les nettoyer et les calibrer.

Le nettoyage a été réalisé à l'aide d'eau distillée et de chloroforme pour enlever d'éventuels tissus végétaux et la graisse. Cette étape a été réalisée avec le plus grand soin pour ne pas toucher les thermocouples.

La calibration a été réalisée à l'aide de différentes solutions de NaCl de concentrations connues.

Les sondes PSY1 ont été placées directement sur le xylème à vif de la tige des semis proche du collet en veillant à rendre complètement étanche la chambre à l'aide d'une graisse. Cette étape a été réalisée avec l'aide de Sébastien François. Pour protéger la sonde des changements de température, de la pluie et du rayonnement, les sondes ont été emballées dans des boîtes en frigolites faites maison, elles-mêmes entourées de papier aluminium. Ces sondes sont reliées à des dataloggers connectés en série à une batterie de voiture. Chaque datalogger stocke les mesures prises à un pas de temps de 20 minutes.

L'installation des sondes PSY1 ne s'est fait que dans la zone HE3 avec 3 sondes par traitement en juin. En juillet seulement une sonde par traitement était disponible et donc 4 sondes ont dû être désinstallées. Puis en août deux sondes supplémentaires ont pu être réinstallées jusqu'au 11 novembre, date à laquelle toutes les sondes ont été retirées et nettoyées.

3.3.3.2. *Potentiel hydrique de la feuille – Chambre à pression de Scholander*

Comme les sondes PSY1 mesurant le potentiel hydrique de la tige ne sont présentes qu'en une zone (HE3), il a été décidé d'également procéder à des mesures ponctuelles du potentiel hydrique des feuilles cette fois dans chaque zone grâce à la chambre à pression de Scholander

La chambre à pression de Scholander, ou bombe de Scholander, utilisée pour ces mesures, est un modèle 1505D-EXP du groupe PMS Instrument. La chambre est connectée à une bouteille d'azote comprimé et mesure le potentiel d'une feuille dans une gamme de 0 à 40 bars, convertissable par la suite en MPa. Pour réaliser la mesure, une feuille fraîche est coupée et placée dans un disque au sommet de la chambre à pression avec le pétiole vers l'extérieur. La chambre est ensuite fermée hermétiquement et la pression augmente progressivement. Lorsqu'une bulle d'eau apparaît au sommet du pétiole, signe que la tension de l'eau à l'intérieur de la feuille est atteinte, la pression est

lue sur le cadran de l'instrument (PMS Instrument,2023). C'est donc une mesure destructive qui demande de couper une feuille par mesure.

Les mesures avec la chambre à pression de Scholander ont été faites sur le terrain dans toutes les zones et tous les traitements sur 19 journées entre fin juin et début novembre avec trois répétitions par mesures (soit 680 mesures). Ces mesures ont été couplées avec le poromètre et ont été réalisées sur des feuilles sélectionnées comme étant grandes, hautes, en bonne santé et à l'ombre. Toutes les mesures ont été réalisées à +-2h du midi solaire pour capter la tension maximale ressentie par les semis. De plus deux nuits de mesures dans la zone HE3 ont été réalisées pour suivre l'évolution du potentiel durant la nuit et pouvoir la comparer au potentiel du sol.

3.3.3.3. *Conductance stomatique - Poromètre*

Comme expliqué au point précédent, les mesures à la chambre à pression de Scholander ont été précédées d'une mesure de conductance stomatique au poromètre avant que la feuille ne soit retirée de l'arbre. La conductance stomatique représente la diffusivité à travers les stomates en mmol/m²/s. C'est une mesure très importante pour comprendre le stress hydrique chez la plante (voir 3.5).

Pour réaliser ces mesures ponctuelles de conductance stomatique des feuilles, le poromètre à diffusion dynamique AP-4, produit par Delta T Devises, a été utilisé. Le poromètre est composé d'une pince qui se fixe sur la feuille et au centre de laquelle se trouve une petite cuvette. C'est dans cette cuvette qu'a lieu la mesure par des cycles d'humidification (par la feuille) – dessiccation (par des dessiccants reliés à la pince et dont l'air sec est envoyé par une pompe). Le capteur du poromètre calcule la vitesse du flux d'air, la température, l'humidité et la luminosité. Les mesures prises par le poromètre sont non destructives, assez rapides et précises.

Une calibration doit être réalisée régulièrement à l'aide de papier mouillé et d'une plaquette comprenant six groupes de fentes dont les résistances à la diffusion sont connues.

3.3.4. *Croissance des semis*

Finalement des mesures de croissance en hauteur et en diamètre au collet ont été réalisées par Frédéric André dans toutes les unités de traitement. 32 semis ont été sélectionnés dans chacune des 12 unités de traitement pour couvrir uniformément les classes de hauteur suivantes : 0-25cm, 25-50cm, 50-100cm, 100-150cm et >150cm. Chacun des semis a été étiqueté et mesuré en mars 2021, mars 2022 et janvier 2023. Depuis 2022 ce n'est plus la hauteur totale, mais l'accroissement de la tige terminale qui a été mesurée pour diminuer l'imprécision de la mesure.

3.4. *Traitement des données et analyses statistiques*

3.4.1. *Traitement général des données*

Les données des différentes sondes et appareils de mesure ont été collectées dans des tableaux Excel. De premières analyses qualitatives de ces jeux de données y ont été réalisées. Ensuite ces tableaux ont été importés dans une base de données Access. Mettre sous forme de base de données tous les types de mesures qui diffèrent par leur nature physique, l'instrument ou par leur pas de temps, est important pour pouvoir les relier entre elles. Grâce à des requêtes Access, des tableaux de données croisées ont pu être exportés sous format Excel. Ces tableaux de données ont ensuite été importés

dans Rstudio pour y être traités, pour réaliser des analyses statistiques ainsi que pour réaliser tous les graphiques présents dans ce mémoire.

3.4.2. Statistiques et Modélisation

Des analyses statistiques ont été effectuées pour évaluer l'impact significatif de divers facteurs, tels que le traitement appliqué ou la composition spécifique, sur différentes variables mesurées (telles que le potentiel hydrique des feuilles, la conductance stomatique, la croissance, etc.). Ces analyses ont été réalisées en utilisant des tests d'analyse de la variance (ANOVA) dans le logiciel Rstudio. L'ANOVA est une technique statistique utilisée pour examiner les différences entre les moyennes de plusieurs groupes. Elle teste l'hypothèse que les moyennes de plusieurs groupes sont égales. Si l'hypothèse est rejetée (c'est-à-dire si la p-valeur obtenue est inférieure à 0,05), cela signifie qu'au moins une des moyennes est significativement différente des autres. Pour déterminer laquelle, un test post-hoc de Tukey est nécessaire pour comparer toutes les paires de moyennes et déterminer quelles moyennes diffèrent significativement.

Des analyses ont été réalisées en utilisant des modèles bivariés (n'utilisant qu'une seule variable indépendante), ajustés dans Rstudio, pour plusieurs objectifs. Ces objectifs incluaient : l'établissement d'une relation entre la permittivité et la teneur en eau du sol pour calibrer les sondes FDR (3.3.2.1.) ; l'ajustement des courbes de rétention selon l'équation de Van Genuchten (Eq.28) (4.2.2.) ; et l'exploration du lien entre la conductance stomatique et une série de variables physiologiques et environnementales, telle que le potentiel hydrique du sol, des tiges et des feuilles, le déficit de pression de vapeur de l'air et des feuilles, ainsi que la radiation corrigée en fonction des photos hémisphériques.

Pour chaque variable, le modèle retenu a été déterminé en comparant les critères d'information d'Akaike (AIC) produit en sélectionnant le plus petit. L'AIC a été préféré au R^2 car il pénalise le nombre de paramètres dans l'optimisation du modèle, évitant ainsi un surajustement du modèle. L'AIC a été préféré au R^2 car celui-ci pénalise le nombre de paramètres dans l'optimisation du modèle et évite donc un surajustement du modèle. Voici la liste d'équations qui ont été testées :

$$\text{Linéaire : } gs = a \times Var + b \quad Eq. 16$$

$$\text{Quadratique : } gs = a \times Var^2 + b \times Var + c \quad Eq. 17$$

$$\text{Cubique : } gs = a \times Var^3 + b \times Var^2 + c \times Var + d \quad Eq. 18$$

$$\text{Exponentielle : } gs = a \times e^{Var \times b} \quad Eq. 19$$

$$\text{Logarithmique : } gs = a \times \text{Log}(Var \times b) \quad Eq. 20$$

$$\text{Puissance : } gs = a \times Var^b \quad Eq. 21$$

$$\text{Inverse : } gs = \frac{a}{Var} + b \quad Eq. 22$$

$$\text{Logistique : } gs = \frac{a}{1 - e^{-b \times (Var + c)}} \quad Eq. 23$$

$$\text{Hyperbolique : } gs = \frac{a}{Var + b} \quad Eq. 24$$

où

- gs est la conductance stomatique [$\text{mmol/m}^2/\text{s}$]
- Var est une des variables indépendantes testées
- a, b, c et d sont des paramètres à ajuster.

Par la suite, trois modèles multivariés (utilisant plusieurs variables indépendantes) ont été testés dans le but de prédire au mieux la conductance stomatique à partir de différentes variables disponibles. Dans chaque modèle, les fonctions utilisées sont déterminées par le meilleur modèle bivarié pour chaque variable parmi les équations 16 à 24. Les modèles multivariés sont construits soit selon le potentiel de tige ou de feuille qui sont considérés comme proche du ressenti hydrique du semis, soit comme la disponibilité en eau du sol et la demande atmosphérique qui se trouvent en amont et en aval de la conductance.

$$gs = gs_{ref} \cdot f(\psi_{tige}) \quad (Eq. 25)$$

$$gs = gs_{ref} \cdot f(\psi_{feuille}) \quad (Eq. 26)$$

$$gs = gs_{ref} \cdot f(\psi_{sol}) \cdot f(VPD(l)) \quad (Eq. 27)$$

où

- gs_{ref} est la conductance stomatique de référence et correspond à la mesure maximum de conductance observée.
- $\psi_{sol}, \psi_{tige}, \psi_{feuille}$ sont les potentiels hydriques du sol, de la tige et de la feuille. [MPa]
- $VPD(l)$ est le déficit de pression de vapeur de l'atmosphère (VPD) ou de la feuille (VPDl) [kPa]

Les résultats des modèles bivariés et multivariés seront présentés dans la partie 4.3.3. traitant de la mesure de conductances stomatiques.

4. Résultats et discussions

Les résultats seront structurés et regroupés en quatre parties. La première traitera des conditions météorologiques et de radiations observées durant la période d'étude. La seconde traitera du statut hydrique du sol à la suite des conditions météorologiques. La troisième partie se concentrera sur le statut hydrique des semis en réponse au statut hydrique du sol et de la demande évaporative de l'atmosphère. Finalement, la quatrième partie traitera de la croissance observée des semis sur la période d'étude.

4.1. Conditions météorologiques durant la période d'étude

Il est dans un premier lieu important de dresser un portrait des conditions météorologiques durant la période d'étude. L'expérience a été réalisée in situ et toutes les mesures et observations de teneur en eau, de potentiel ou de conductance sont influencées par des variables comme la pluie, la température, l'humidité relative de l'air et la radiation.

4.1.1. Température et précipitation

Les données de pluviométrie et de température de la station Pameseb de Louvain-la-Neuve entre 1999 et 2019 ont été combinées pour obtenir un cumul annuel moyen et un intervalle de confiance de 95%. Cela permet de comparer les années 2021 et 2022 entre elles et par rapport à la moyenne.

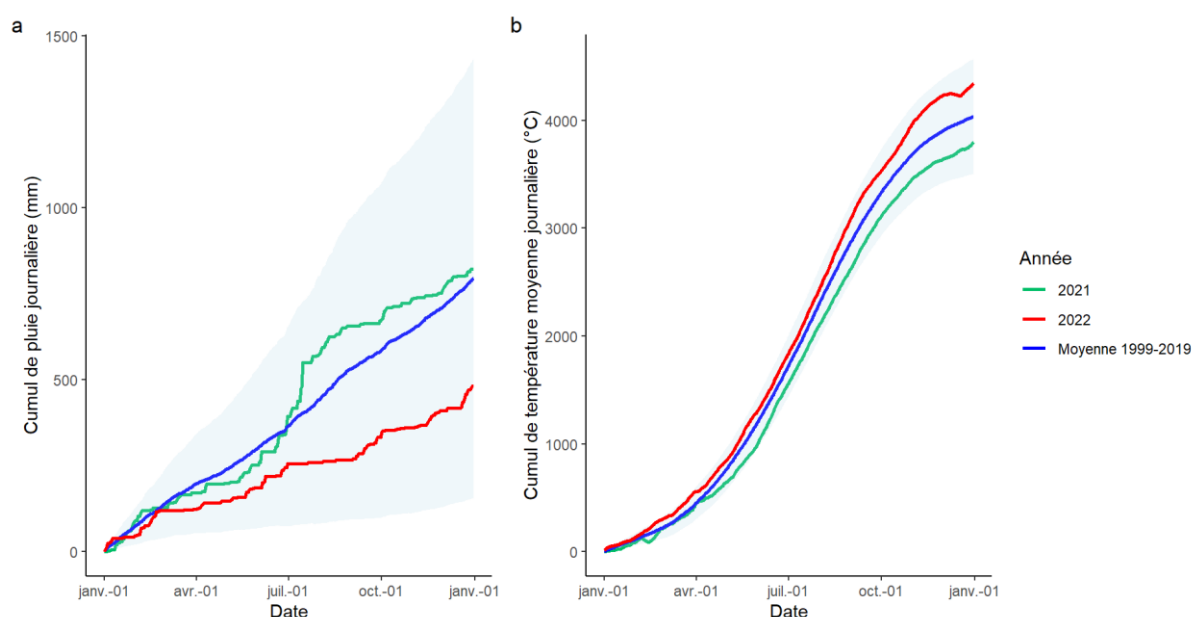


Figure 8. Données météorologiques de cumul de pluviométrie journalière (a) en mm et de température moyenne journalière (b) en °C pour la station Pameseb de Louvain-La-Neuve pour l'année 2021 et 2022 avec une comparaison à la moyenne entre 1999 et 2019 et son intervalle de confiance à 95%. Données issues du CRA-W

Les années 2021 et 2022 sont très contrastées. L'année 2021 a été marquée par de grosses précipitations en été qui ont conduit à de sévères inondations en Wallonie. De plus, le cumul de température sur l'année a été bien inférieur à la moyenne. L'année 2022 a en revanche été une année très chaude et particulièrement sèche. Une pente quasi nulle en été puis en automne sur la figure 8.(a) marquent des épisodes de sécheresse.

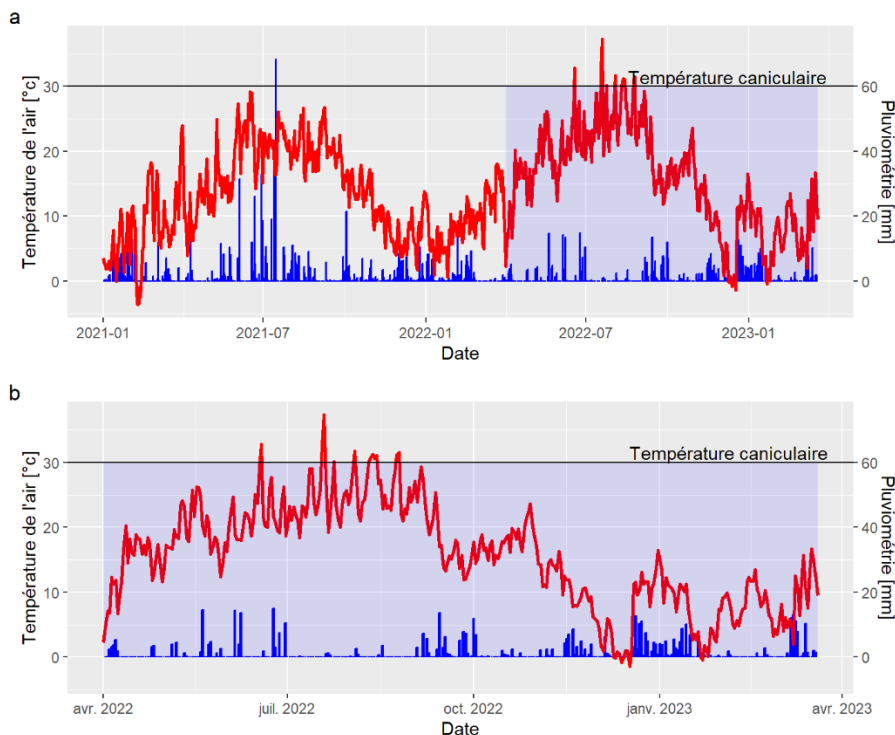


Figure 9. Température maximum journalière de l'air (rouge) et pluviométrie journalière (bleu) entre janvier 2021 et avril 2023 en haut (a) et entre avril 2022 et avril 2023 en bas (b) pour le bois de Lauzelle. La température est considérée comme caniculaire quand elle dépasse 30°C. Données issues du CRA-W.

Le suivi temporel de la figure 9.(a) met en lumière les grandes différences de précipitations entre l'été 2021 et 2022. En 2022, la période de sécheresse est principalement localisée entre juillet et septembre puis entre octobre et novembre (figure 9.(b)). Les températures de l'été 2022 peuvent être considérées comme caniculaires d'après la définition de l'IRM (institut royal de météorologie) qui stipule qu'une vague de chaleur doit comporter 5 jours consécutifs au-delà de 25°C dont trois jours à 30°C. L'IRM se base sur les températures d'Uccle qui sont en moyenne 0,3°C plus chaud qu'à Louvain-la-Neuve. (IRM, 2023 ; Mievis, 2022)

La période d'étude durant laquelle la majorité des mesures ont été réalisées s'étend de début juillet à fin décembre 2022. Cette période aura été chaude et sèche, voire très sèche par moment. Cela va avoir un impact sur le statut hydrique du sol présenté dans le point 5.2.

4.1.2. Radiation

Après avoir caractérisé les températures et les précipitations durant la période d'étude, il est intéressant de s'intéresser au rayonnement transmis jusqu'aux semis. Les données météorologiques de la station Pameseb de Louvain-la-Neuve contiennent des informations quant à la radiation. Il est toutefois important de prendre en considération l'effet de la forêt et du couvert pour déterminer la part du rayonnement arrivant jusqu'aux semis. C'est pourquoi des photos hémisphériques ont été réalisées dans chacune des zones.

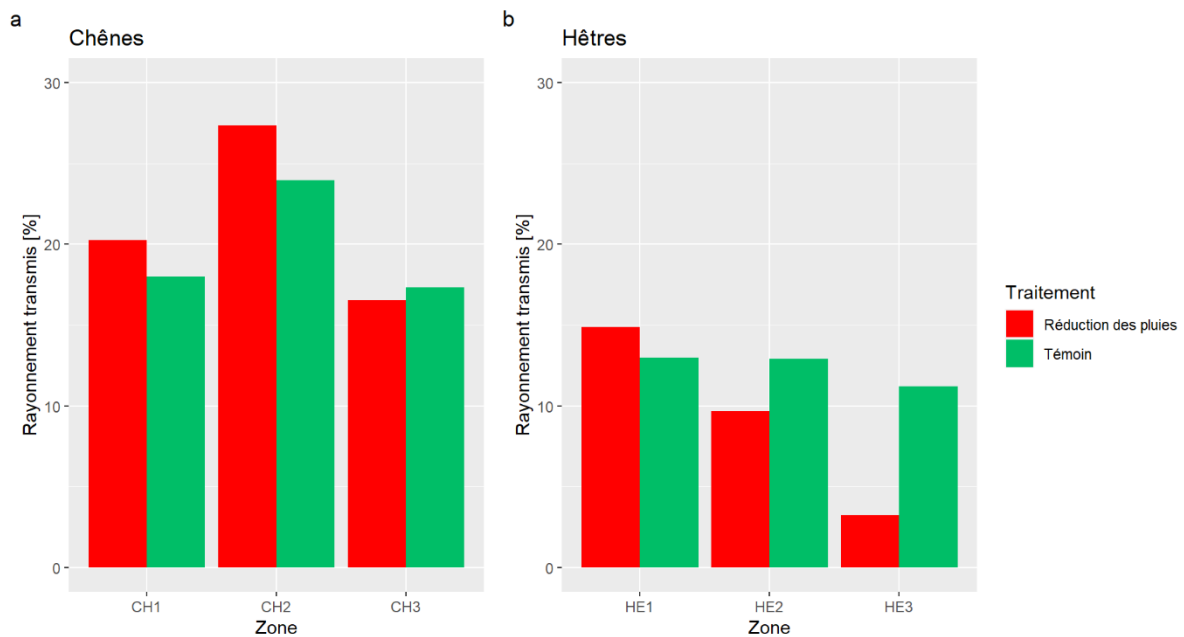


Figure 10. Rayonnement transmis issu des photos hémisphériques pour chaque zone illustrée selon le traitement.

Le rayonnement transmis est en moyenne de 19% pour les chênes et de 11% pour les hêtres. Cette forte différence est expliquée par la structure de la canopée et les besoins en lumière des semis. Comme énoncé dans le point 3.6, les semis de chêne ont des besoins en lumière plus importants que les hêtres, et se développent donc dans des trouées plus importantes. Les différences de traitement sont très peu significatives en raison de la proximité spatiale des unités de traitement. La zone de hêtres HE3 fait office d'exception et présente un rayonnement transmis de 9% pour l'unité témoin et de seulement 3% pour l'unité de réduction des pluies. Pour vérifier cela, des capteurs de rayonnement photosynthétique actif ont été installés dans cette zone pour mettre en évidence les différences de traitement.

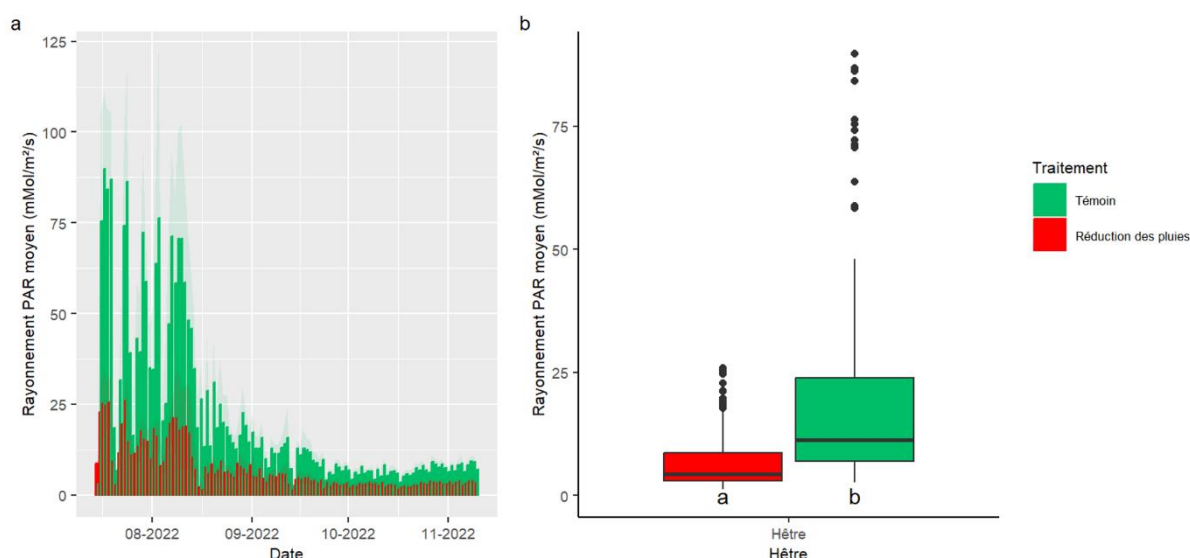


Figure 11. Suivi temporel (a) et impact spatial du traitement (b) sur le rayonnement photosynthétique actif journalier entre le 15 juillet et le 15 novembre 2022 pour la zone de hêtres HE3 illustré selon le traitement. Les données sont issues des sondes PAR.

Les données de rayonnement photosynthétique actif représentées sur la figure 11 confirment les résultats de la figure 10 et les différences significatives observées pour la zone HE3. L'unité de traitement témoin a journalièrement un rayonnement photosynthétique actif de 7,2 mMol/m²/s en moyenne de plus que l'unité de réduction des pluies. Cette différence est expliquée par un couvert plus dense au-dessus de l'unité de réduction des pluies et va avoir un effet sur le statut hydrique du sol et des semis.

4.2. Impact du dispositif de réduction des pluies sur le statut hydrique du sol

Les précipitations, tout comme la demande évaporative et le prélèvement d'eau par la plante, influencent le statut hydrique du sol. Il est donc important de déterminer l'impact du dispositif de réduction des pluies sur celui-ci. Comme présenté dans le point 4.1.3, différents capteurs ont été installés dans le but de connaître la teneur en eau et le potentiel hydrique du sol.

4.2.1. Teneur en eau du sol

Grâce aux sondes FDR CS616 présentes dans toutes les zones et calibrées à l'aide de mesures gravimétriques de teneur en eau volumétrique (voir 4.3.2.1.), un suivi temporel sur toute la durée de l'expérience a été réalisé. Les zones ont été regroupées par espèces et les données par moyenne journalière pour être représentées sous forme de suivi temporel (figure 12), de diagramme en boîte (figure 13) et d'une analyse statistique (tableau 3).

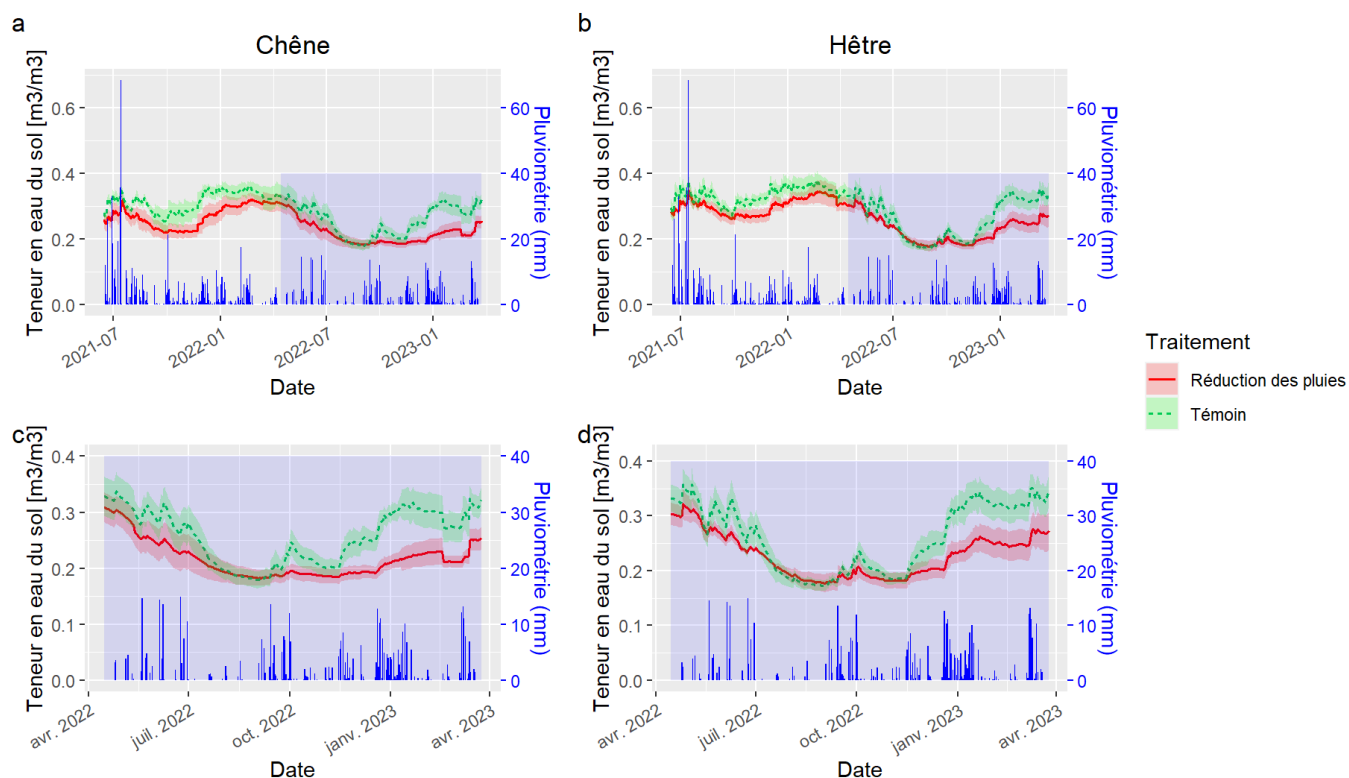


Figure 12. Suivi temporel de la moyenne de la teneur en eau du sol pour les trois zones de chênes (a et c) et les trois zones de hêtres (b et d) illustrées selon le traitement. La période considérée s'étend de juin 2021 à avril 2023 pour les graphes du haut (a et b) et entre avril 2022 et avril 2023 pour les graphes du bas (c et d). Les précipitations journalières sont représentées en bleu.

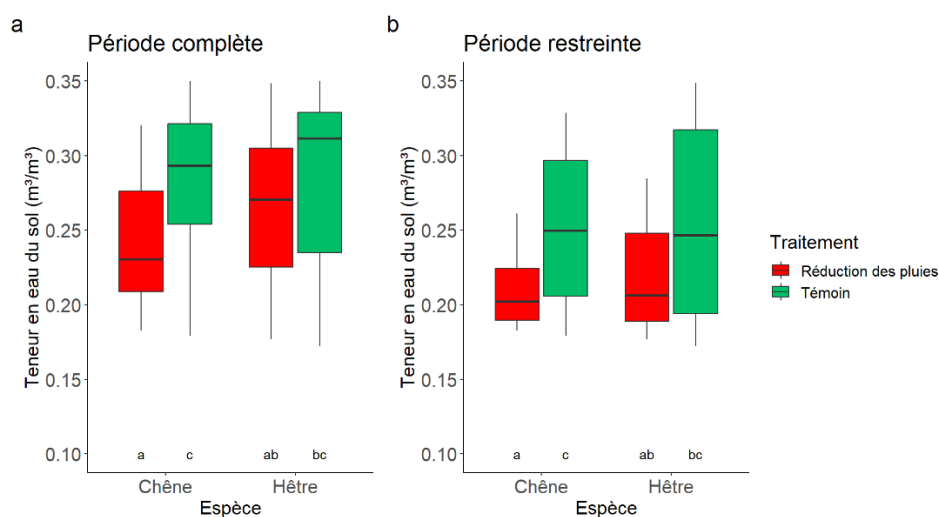


Figure 13. Impact d'une réduction des pluies sur la teneur en eau du sol pour les zones de hêtre et de chêne pour la période complète entre juin 2021 et avril 2023 (a) et pour la période restreinte entre avril 2022 et avril 2023 (b)

Tableau 3. Résultat d'une régression linéaire pour déterminer l'effet du traitement et de l'espèce sur la teneur en eau pour la période complète (juin 2021 à avril 2023) et pour la période restreinte (avril 2022 à avril 2023) ($Teneur\ en\ eau\ (m^3/m^3) \sim Espèce * ZONE$)

	<i>Période complète</i>	<i>Période restreinte</i>
	P valeur	P valeur
Traitement	2,2e-16***	2,2e-16***
Composition	6,7e-16***	0,004109**
Composition * Traitement	0,01618*	0,080259
	Estimation (m³/m³)	Estimation (m³/m³)
Chênes Témoin	0,2852	0,2507
Chênes Réduction des pluies	0,2424	0,2078
Hêtres Témoin	0,2964	0,2534
Hêtres Réduction de pluies	0,2630	0,2190

Sur la période complète (juin 2021 à avril 2023) et sur la période restreinte (avril 2022 à avril 2023) il y a bien une différence significative de l'effet du traitement et de l'espèce. D'après le tableau 3, la teneur en eau moyenne est 0,03 [m³/m³] plus faible dans l'unité de réduction des pluies. On observe également des valeurs de teneur en eau plus faibles pour les zones de chênes que pour les zones de hêtres.

Mais c'est bien la figure 12 qui permet de comprendre l'évolution de la teneur en eau et de mettre en évidence les différences de traitement. En effet, les dynamiques d'assèchement et d'humidification ne sont pas les mêmes. Lors de la saison de végétation de 2021, les teneurs en eau sont restées relativement hautes étant donné la grande quantité de précipitations. Des valeurs systématiquement plus basses sont observées dans l'unité de réduction des pluies bien que la différence entre les deux courbes ait parfois été ténue. Les teneurs les plus élevées en eau ont été atteintes au début du printemps 2022. Ensuite, la diminution des précipitations a entraîné une diminution des teneurs en eau dans les deux traitements avec une vitesse plus grande pour l'unité témoin. Les sécheresses entre juillet et septembre puis d'octobre à novembre 2022 ont entraîné des teneurs très basses d'environ 0,18 [m³/m³] et plus aucune différence de traitement. Lorsque la pluie est revenue, la recharge a été plus rapide pour l'unité témoin et a conduit à des valeurs de teneur en eau beaucoup plus élevées. Excepté pendant les périodes de grosses sécheresses, un effet du dispositif de réduction des pluies est observé. Cet effet est particulièrement important dans la phase de recharge après une sécheresse. Le suivi de la période de végétation de 2023 va probablement être très intéressante en raison de la grande différence entre les statuts hydriques des sols.

La différence de teneur en eau entre hêtres et chênes pourrait être expliquée par les différences de radiation présentées dans le point 5.1.2.

La teneur en eau du sol est une indication intéressante de la ressource en eau, mais ne représente pas réellement la disponibilité de l'eau pour la plante. C'est pourquoi le potentiel hydrique sera utilisé à ce dessein.

4.2.2. Courbes de rétention en eau

Il est intéressant de réaliser des courbes de rétention en eau faisant le lien entre la teneur en eau et le potentiel hydrique du sol. L'objectif étant de mieux comprendre la nature du sol, mais surtout d'obtenir son potentiel hydrique dans chaque zone à partir de la teneur en eau mesurée par les sondes FDR CS616. En effet, les tensiomètres TEROS21, fournissant le potentiel hydrique du sol, ne sont présents que dans la zone HE3. Or, il serait intéressant d'avoir des données pour chacune des zones. De plus, les sondes TEROS ne sont présentes que depuis l'été 2022 alors que les sondes FDR collectent des données depuis juillet 2021.

L'objectif est donc de trouver l'équation qui permettrait de passer d'une teneur en eau à un potentiel hydrique du sol. Pour ce faire, ce travail se base sur l'équation de Van Genuchten pour mettre en relation la teneur en eau du sol θ et le potentiel hydrique du sol sous une forme logarithmique pF (Van Genuchten, 1980).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha \cdot 10^{pF})^n)^{\left(1 - \frac{1}{n}\right)}} \quad (Eq. 28)$$

où

- θ = Teneur en eau du sol [m^3/m^3]
- θ_r = Teneur en eau résiduelle [m^3/m^3]
- θ_s = Teneur en eau à saturation [m^3/m^3]
- pF = logarithme du potentiel hydrique en cm
- α et n = deux paramètres à ajuster

Les régressions présentes dans les points ci-dessous ont été obtenues par cette équation en faisant varier les paramètres θ_r , θ_s , α et n en minimisant la somme des carrés des écarts avec les observations pour coller au mieux avec celles-ci. Cela a été réalisé avec le solveur d'Excel et des fonctions dans Rstudio.

Trois types de données sont disponibles pour dresser une relation teneur en eau vs potentiel hydrique du sol : les données issues des tensiomètres et des sondes FDR, les données issues des échantillons de sol pesés et mesurés au WP4C et finalement les mesures réalisées avec le dispositif HYPROP.

- FDR vs Tensiomètre

L'avantage de ce jeu de données est qu'il représente un suivi temporel sur la période entre juillet 2022 et novembre 2022 et couvre une large gamme de valeurs. Il a en outre un nombre assez important d'observations qui est de 2380. En revanche, les tensiomètres n'étant présents qu'en HE3, une seule zone est couverte. Or, il est intéressant de faire les courbes de rétention pour toutes les zones. De plus, après représentation graphique, on observe que la teneur en eau du sol ne descend pas en dessous de 20%, et ce, même avec des pF de plus de 4 (Figure 12). Ce qui semble trop élevé en comparaison avec la littérature. Une hypothèse qui expliquerait cela est que les tensiomètres mesurent le potentiel à 15cm de profondeur là où les FDR mesurent sur les 30 premiers centimètres. Il se pourrait que la teneur en eau du sol après les 15 premiers centimètres soit plus humide, notamment due au prélèvement d'eau dans les premiers centimètres par les racines.

Si l'on décidait de tout de même utiliser ce jeu de données, l'équation de Van Genuchten aurait comme paramètres : $\theta_r=0,195[m^3/m^3]$, $\theta_s=0,5[m^3/m^3]$, $\alpha = 0,0149$, $n = 2,672$ et donnerait un R^2 de 0,813.

- Pesées et mesures au WP4C

Le jeu de données présente le désavantage de ne pas couvrir la gamme de valeurs que couvrent les sondes FDR, ce qui donne très peu de poids à l'équation de Van Genuchten. De plus, les observations sont beaucoup moins nombreuses (80). Une partie des observations ont en effet été écartées, car les échantillons avec une haute teneur en eau étaient associés à un potentiel hydrique issu du WP4C considéré comme peu fiable. En effet la précision et la fiabilité du WP4C diminue avec l'augmentation du potentiel hydrique. En revanche, ces observations couvrent toutes les zones et complètent bien la gamme de mesures faites avec le dispositif HYPROP.

- HYPROP

Des échantillons ont été prélevés dans toutes les zones de hêtre et dans une seule zone de chêne, car les trois zones de chênes étant spatialement très proches, elles ont été supposées avoir un profil de sol semblable. Le sol a donc été considéré comme ayant les mêmes propriétés dans les trois zones. Ces échantillons ont ensuite été passés dans le dispositif HYPROP et ont permis de produire un profil très complet de courbe de rétention pour des teneurs en eau supérieure à 0,2 [m³/m³]. Le dispositif HYPROP ne peut en effet pas descendre en dessous de 0,2 [m³/m³] de teneur en eau due à l'apparition de cavitation. Il est donc intéressant de coupler ces mesures avec les données issues des pesées - WP4C pour obtenir un profil plus complet. Les données FDR-Tensiomètre n'ont, comme expliquées précédemment, pas été prises en compte. En faisant cela, quatre courbes de rétentions ont été produites : trois pour les hêtres et une pour les zones de chênes.

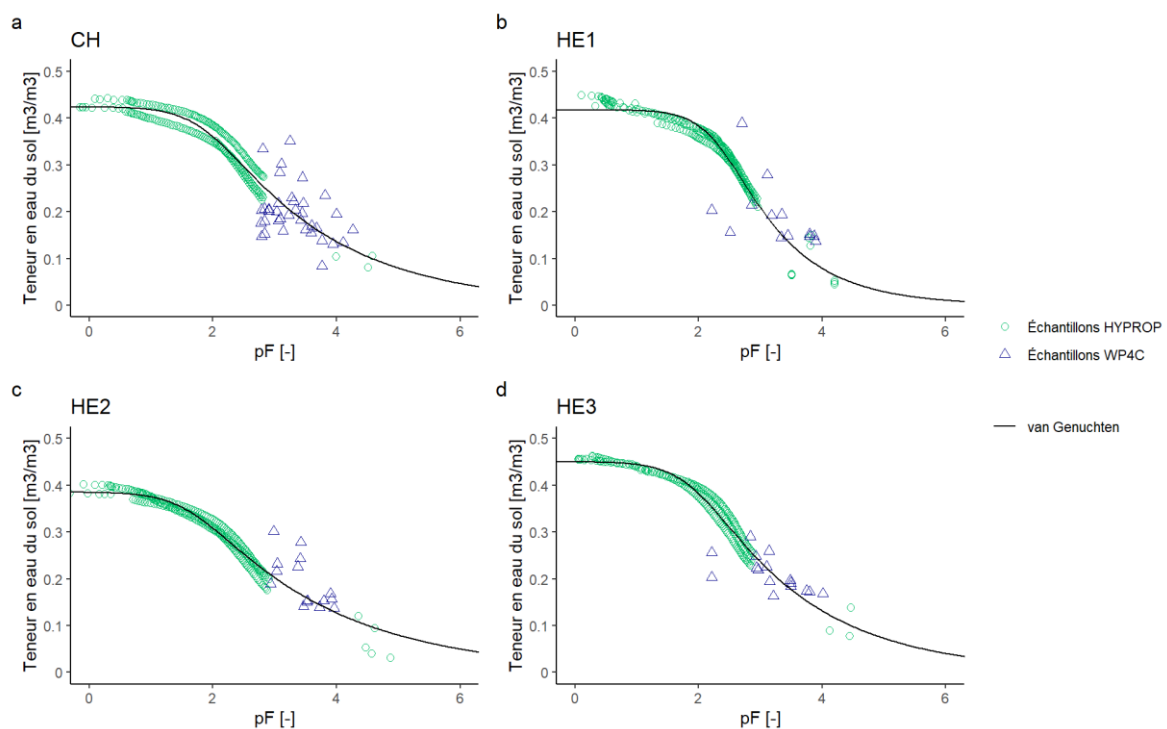


Figure 14. Lien entre la teneur en eau du sol en m³/m³ et le potentiel hydrique pF du sol pour les données Hyprop et WP4C selon la zone. L'équation de Van Genuchten a été calculée pour chacune des trois zones de hêtres et pour la zone de chênes.

La zone HE1 présenterait une double porosité à pF très faible. Mais en raison d'une gamme de pF observée sur le terrain entre 2 et 4,5, celle-ci n'a pas été prise en compte, car elle n'impacterait que peu la conversion de teneur en eau vers le potentiel hydrique.

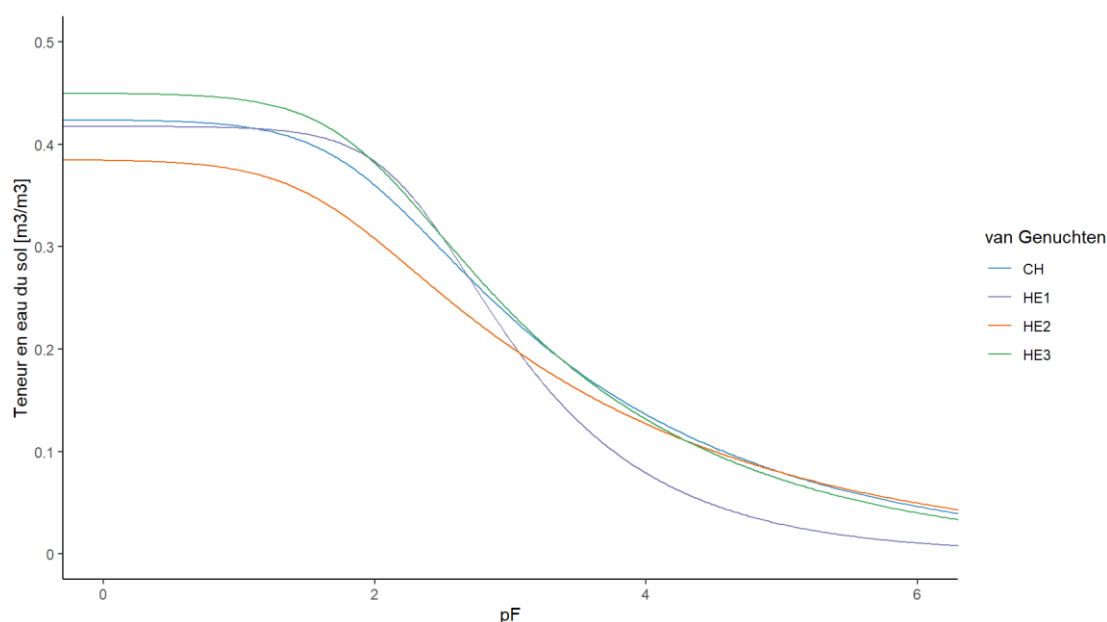


Figure 15. Représentation des courbes de rétention de Van Genuchten pour chacune des zones de hêtres (HE1,HE2,HE3) et pour les zones de chênes (CH) calculées à partir des données de teneur en eau du sol et de pF issus du dispositif HYPROP, des pesées et du WP4C.

Tableau 4. Paramètres de l'équation de régression de Van Genuchten pour les données Hyprop et WP4C

ZONE	TENEUR EN RÉSIDUELLE Θ_R	EAU TENEUR EN EAU A SATURATION Θ_S	α	N	R^2
CH	0	42,40	0,0129	1,2337	0,89
HE1	0	41,76	0,0046	1,4352	0,94
HE2	0	38,51	0,0232	1,2037	0,94
HE3	0	45,00	0,0118	1,2578	0,94

Les différentes équations de Van Genuchten, représentées sur la figure 15, sont relativement proches. Le sol de la zone HE1 a des pF plus faibles que les trois autres zones quand la teneur en eau du sol est basse. La teneur en eau à saturation de la zone HE2 est plus faible que pour les autres zones. Ces équations de régression vont servir à transformer des teneurs en eau issues des sondes FDR en potentiel hydrique.

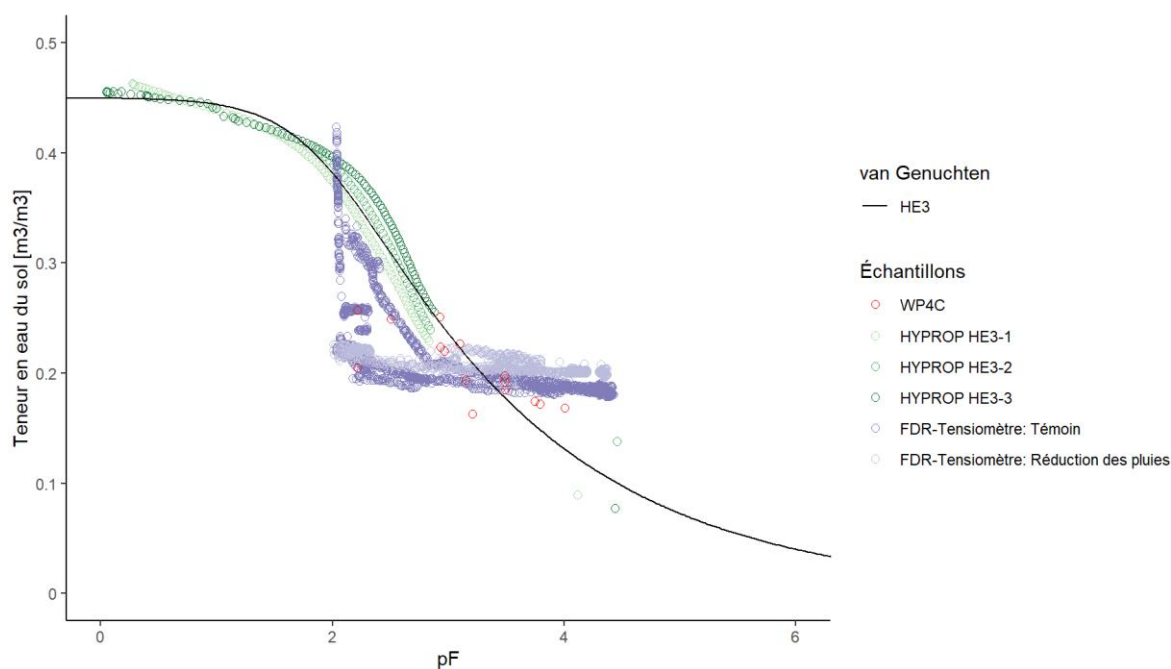


Figure 16. Relation entre le pF et la teneur en eau du sol (θ) pour les trois jeux de données (FDR-Tensiomètre, Hyprop et WP4C-Gravimétrique) dans la zone HE3. La régression de Van Genuchten ne prend pas en compte les données FDR-Tensiomètre.

La figure 16 a pour objectif d'illustrer les différents jeux de données disponibles pour la zone HE3 ainsi que l'équation de Van Genuchten utilisée finalement. Il est intéressant de noter qu'une partie des observations FDR-Tensiomètre en zone témoin suit correctement la descente dans les données HYPROP. Cette partie des données correspond à une dessiccation du sol (tout comme les données HYPROP), là où les observations verticales proches de pF 2 correspondent à une réhumidification (Annexe 3). Il y aurait donc un effet d'hystérèse. Pour une teneur en eau donnée, le pF du sol est nettement plus important en période d'assèchement qu'en période d'humidification. Mais il est à noter, premièrement, que les données verticales à pF 2 ne peuvent pas être prises en compte, car elles représentent la limite des mesures possibles avec les TEROS 21. Deuxièmement, un effet retard est peut-être présent étant donné que les tensiomètres sont moins réactifs que les sondes FDR.

4.2.3. Potentiel hydrique du sol

Grâce aux équations obtenues au point ci-dessus, les teneurs en eau issues des sondes FDR ont été transformées en potentiel hydrique pour toutes les zones de chênes et de hêtres pour la période entre juin 2021 et avril 2023 (Annexe 4). Des moyennes par espèces ont ensuite été calculées et représentées sur les figures 17 et 18 et dans le tableau 5.

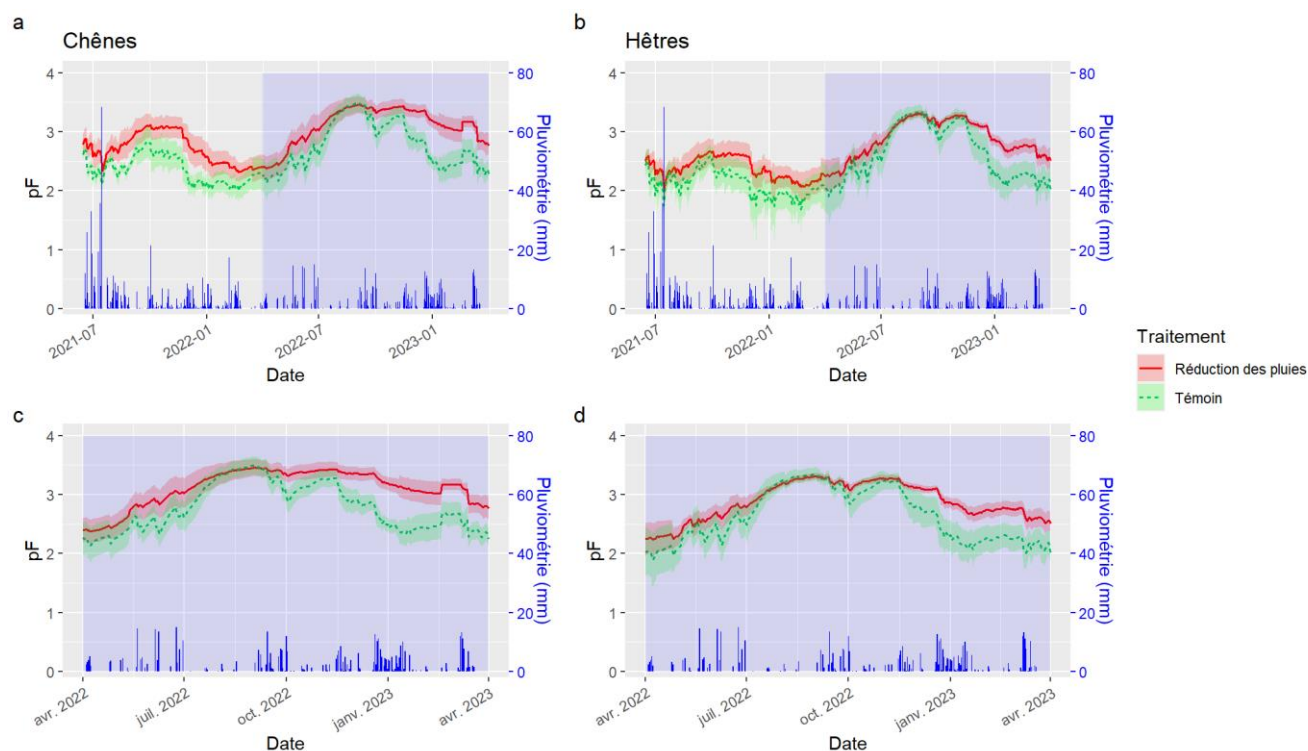


Figure 17. Suivi temporel du pF pour les trois zones de chênes (a et c) et pour les trois zones de hêtres (b et d) à partir des données issues des sondes FDR illustrées selon le traitement pour la période complète entre juin 2021 et avril 2023 (a et b) et une période restreinte entre avril 2022 et avril 2023 (c et d). Les précipitations journalières sont représentées en bleu.

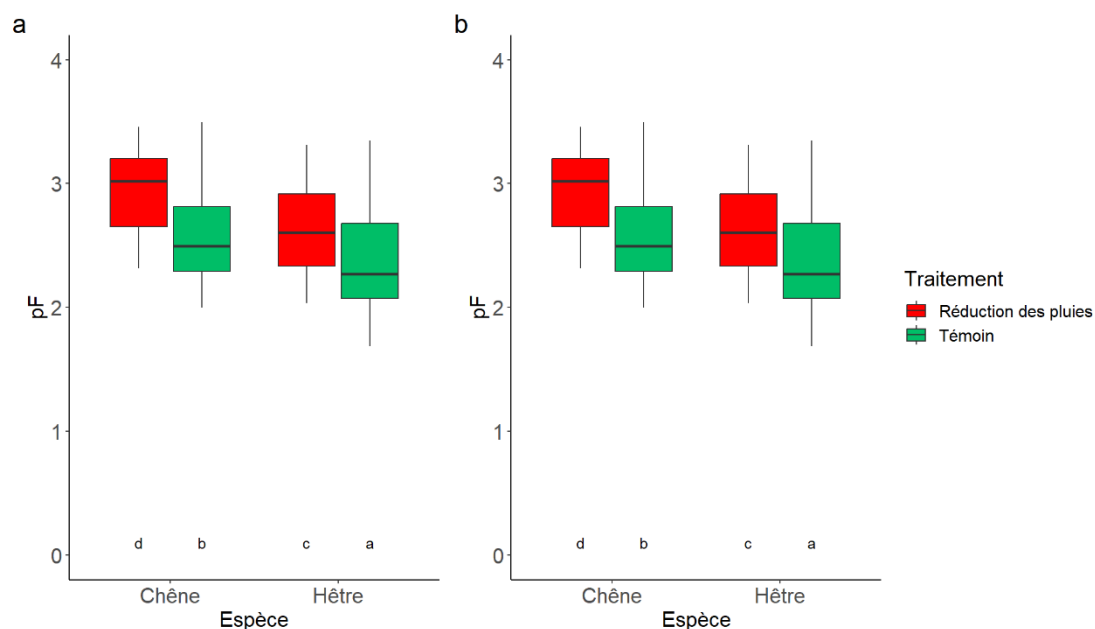


Figure 18. Impact d'une réduction des pluies sur la teneur en eau du sol pour les zones de hêtre et de chêne pour la période complète entre juin 2021 et avril 2023 (a) et pour la période restreinte entre avril 2022 et avril 2023 (b).

Tableau 5. Résultat d'un modèle linéaire pour déterminer l'effet du traitement et de l'espèce sur le pF issu des sondes FDR pour la période complète (juin 2021 à avril 2023) et pour la période restreinte (avril 2022 à avril 2023) ($pF \sim \text{Espèce} * \text{Traitement}$).

	<i>Période complète</i>	<i>Période restreinte</i>
	P valeur	P valeur
Traitement	2e-16***	2e-16***
Espèce	2e-16***	2e-16***
Espèce * Traitement	0,0033**	0,0366*
	Estimation (pF)	Estimation (pF)
Chênes Témoin	2,590	2,777
Chênes Réduction des pluies	2,933	3,110
Hêtres Témoin	2,402	2,628
Hêtres Réduction de pluies	2,657	2,879

Comme pour les figures 12 et 13 de teneur en eau, les figures 17 et 18 ainsi que le tableau 5 nous montrent qu'il y a un effet de l'espèce et du traitement sur le potentiel hydrique du sol. En effet, une différence de 0,3 de pF entre les unités témoin et de réduction des pluies est observée. La figure 18 permet de mettre en évidence les différences des dynamiques temporelles du pF. La dynamique est la même pour les deux traitements avec une augmentation progressive du pF dans les périodes de sécheresse et une diminution rapide lors de la recharge. Cependant l'augmentation du pF est un peu plus rapide pour l'unité témoin et sa diminution est plus forte après recharge. Durant la période de sécheresse, les deux traitements se rejoignent à un pF d'environ 3,5.

La zone HE3 bénéficie d'un deuxième jeu de données de potentiel hydrique du sol provenant des tensiomètres TERO21. Les deux jeux de données sont mis en relation dans la figure 19.

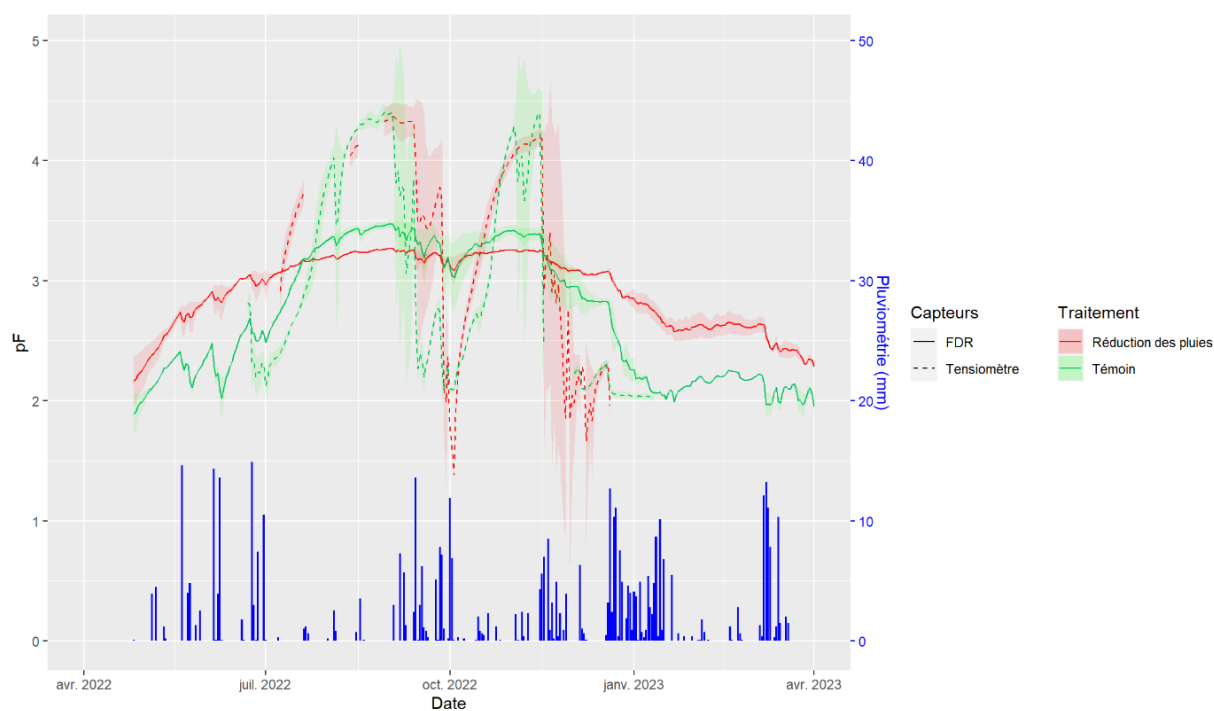


Figure 19. Suivi temporel du pF pour la zone HE3 de hêtres selon les données des tensiomètres (pointillés) et des FDR (pleine) illustré selon le traitement pour la période entre avril 2022 et avril 2023. Les précipitations journalières sont représentées en bleu.

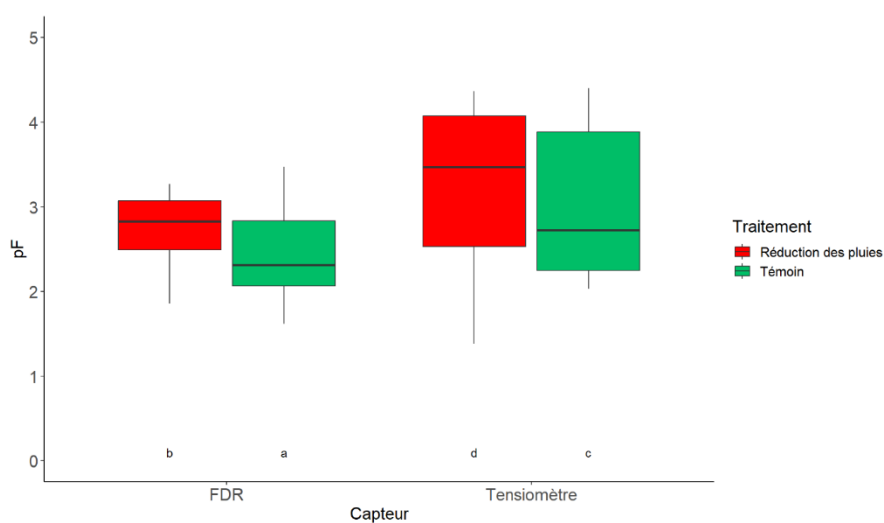


Figure 20. Impact de la réduction des pluies et du capteur utilisé sur le pF journalier du sol de la zone de hêtres HE3 sur la période entre juillet et novembre 2022.

Les figures 19 et 20 montrent la différence très significative des deux jeux de données. Les mesures au tensiomètre ont une amplitude beaucoup plus grande que les mesures issues des sondes FDR dans la zone HE3 sur la période entre juillet et novembre 2022. Comme expliqué dans le point 4.1.3. ces deux capteurs ne mesurent pas la même partie du sol. En effet, les sondes FDR intègrent la teneur en eau sur 30cm là où le potentiel hydrique des tensiomètres a été mesuré en un point à 15cm de profondeur.

L'effet du traitement semble avoir une même dynamique entre les deux capteurs avec un dispositif

témoin ayant un pF plus faible que le dispositif de réduction des pluies. Lors des deux pics de sécheresses, la tendance s'inverse. Malgré cela, les valeurs des données issues des sondes FDR ne semblent que peu exploitables en raison des grosses incertitudes quant à la fiabilité des mesures. Une explication à cela serait que les sondes FDR ne mesurent pas bien les teneurs en eau en dessous de $0,2 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (figure 16), en plus de ne pas mesurer la même portion de sol. Il a donc été décidé de ne pas prendre en compte les données provenant des sondes FDR dans la suite de ce travail.

4.3. Impact du dispositif de réduction des pluies sur le fonctionnement hydraulique des semis

Après avoir analysé le statut hydrique du sol selon le traitement et la zone, la suite de ce travail se concentre sur le statut hydrique des semis en utilisant le potentiel hydrique de la tige et des feuilles ainsi que la conductance stomatique. L'objectif est de mettre en évidence, comprendre et prédire le fonctionnement hydrique des semis dans une situation de stress.

4.3.1. Potentiel hydrique de la tige

Le potentiel hydrique de la tige a été mesuré à l'aide d'un psychromètre (PSY1) directement placé contre le xylème du semis uniquement dans la zone HE3 de hêtres (voir point 4.3.3.1.). Ce potentiel peut être mis en relation avec le potentiel hydrique du sol pour comprendre la circulation de l'eau depuis le sol jusque dans la plante. Les figures 21 et 22 ainsi que le tableau 6 permettent de montrer le suivi temporel, les gammes de valeurs du potentiel hydrique de la tige, et de les mettre en lien avec le potentiel hydrique du sol issu des tensiomètres TEROS21 ainsi que ceux obtenus des sondes FDR CS616.

À partir de ce point, le potentiel hydrique sera exprimé en MPa plutôt qu'en pF pour faciliter la comparaison avec la littérature. Les pF du sol ont donc été transformés en MPa via l'équation 15. Les données de potentiel hydrique issues des sondes FDR qui ont été écartées comme expliqué dans le point 5.2.3. sont représentées ici pour montrer l'impact de la forme logarithmique du pF et la différence très significative avec les autres potentiels.

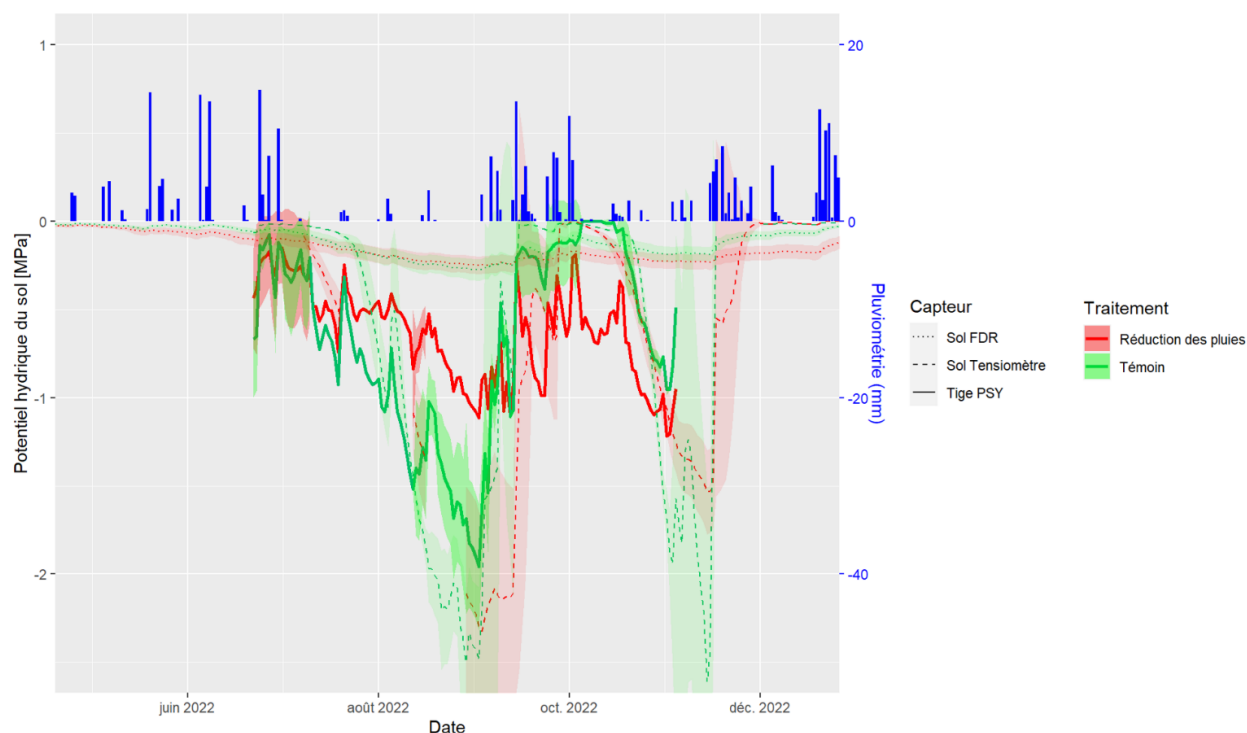


Figure 21. Suivi temporel du potentiel hydrique (MPa) du sol (mesure directe avec des tensiomètres ou indirecte à partir de sondes de teneur en eau FDR) et des tiges (psychromètre) dans la zone HE3 de hêtres ; illustration selon le traitement pour la période entre mai et décembre 2022. Les précipitations journalières sont représentées en bleu.

Le suivi temporel du potentiel hydrique de la tige (représenté par un trait plein épais) sur la figure 21 met en évidence la différence entre les traitements. Comme pour les teneurs en eau et le potentiel du sol, on observe une diminution du potentiel hydrique lors des sécheresses puis une augmentation lors du retour des précipitations. Mais il y a bien un écart d'amplitude entre les deux traitements et au fur et à mesure que la sécheresse s'allonge, la différence de potentiel augmente avec le potentiel de l'unité témoin qui chute. Cette différence contre-intuitive signifierait que les semis de l'unité témoin seraient plus stressés que les semis sous les toits. Trois hypothèses peuvent être proposées pour expliquer cette différence :

- Une première explication à cette différence est un manque de répétitions. En effet, il n'y avait qu'un à deux psychromètres installés dans chaque traitement, ce qui ne donne qu'une faible fiabilité aux résultats.
- Une seconde hypothèse est que la différence de potentiel serait due à la différence de radiation perçue par les semis des deux traitements. Comme montré dans le point 5.1.2. il y a une différence d'ombrage entre les deux traitements qui provoquerait une différence de demande évaporative pour les semis. Les semis de l'unité témoin auraient une demande évaporative plus élevée que sous le toit.
- Une troisième hypothèse est qu'une disponibilité en eau moins grande de manière continue pendant deux ans, due au dispositif de réduction des pluies, a entraîné un développement du système racinaire en profondeur des semis. Les semis sous le toit se seraient adaptés au stress continu subi et absorberaient l'eau à des profondeurs où celle-ci reste davantage disponible durant les périodes très sèches.

La figure 21 permet également de mettre une nouvelle fois en évidence les différences très significatives entre les mesures de potentiel hydrique du sol prises avec les tensiomètres et les mesures indirectes des sondes FDR. Cela confirme le choix fait au point 5.2.3. de ne pas utiliser les données provenant des sondes FDR pour expliquer le statut hydrique des semis.

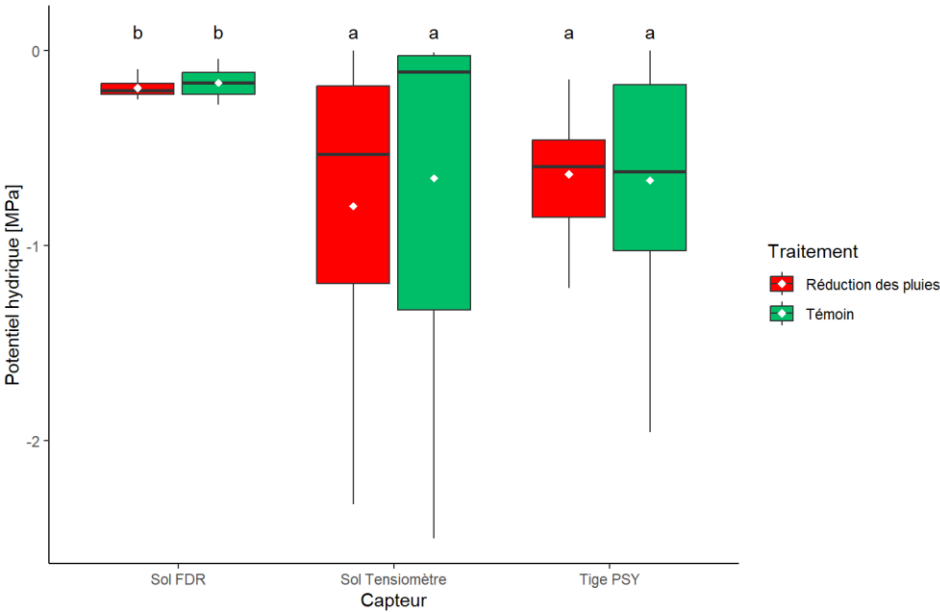


Figure 22. Impact du type de capteur et du traitement sur le potentiel hydrique (MPa) moyen journalier du sol (FDR et Tensiomètre) et de la tige (Psychromètre) pour la zone de hêtres HE3 sur la période entre juillet 2022 et novembre 2022.

Tableau 6. Résultat d’un modèle linéaire pour déterminer l’effet du traitement et du capteur sur le potentiel hydrique du sol (FDR et Tensiomètre) et de la tige (PSY). La période considérée s’étend de juillet à novembre 2022. (Potentiel hydrique [MPa] ~ Capteur * Traitement).

	P valeur	
Capteur	2e-16***	
Traitement	0,2876	
Capteur * Traitement	0,1487	
	Estimation Témoïn (MPa)	Estimation Réduction des pluies (MPa)
Sol FDR	-0,168	-0,192
Sol Tensiomètre	-0,655	-0,798
Tige PSY	-0,7156	-0,634

D’après la figure 22, en écartant les données des sondes FDR, il n’y a pas de différence significative sur la moyenne des potentiels de tige et de sol issus des tensiomètres sur la période de mesures (juillet à novembre 2022). D’un point de vue de la dynamique temporelle sur la figure 22, le potentiel de sol et de tige suivent les mêmes patterns. En revanche, la différence de potentiel ente le sol et la tige pour l’unité de réduction des pluies augmente grandement à mesure que la sécheresse s’installe, avec le potentiel hydrique du sol diminuant fortement. Un potentiel hydrique plus faible dans le sol que dans la tige pose question quant au gradient de potentiel attendu pour faire circuler l’eau (voir point 3.5.1.2.). Outre le souci de fiabilité des mesures du potentiel hydrique des tiges en raison du manque de répétition, cette différence entre le sol et la tige pourrait être expliquée par une différence entre le

potentiel réel du sol à 15cm (profondeur à laquelle les tensiomètres sont installés) et le potentiel du sol ressenti par la plante. En effet, la différence entre le potentiel hydrique du sol et de la tige participe à donner du poids à l'hypothèse d'un système racinaire plus développé et profond sous le dispositif de réduction des pluies pour pallier le stress continu.

Pour vérifier cette hypothèse, il est intéressant de mettre graphiquement en relation le potentiel hydrique de la tige et du sol en séparant les données prises de jour (entre 10h-15h) et de nuit (entre 00h et 6h). Durant la nuit, il est attendu que le système soit à l'équilibre dû à la faible demande évaporative et aux stomates fermés et que le potentiel hydrique du sol soit égal au potentiel hydrique de la tige.

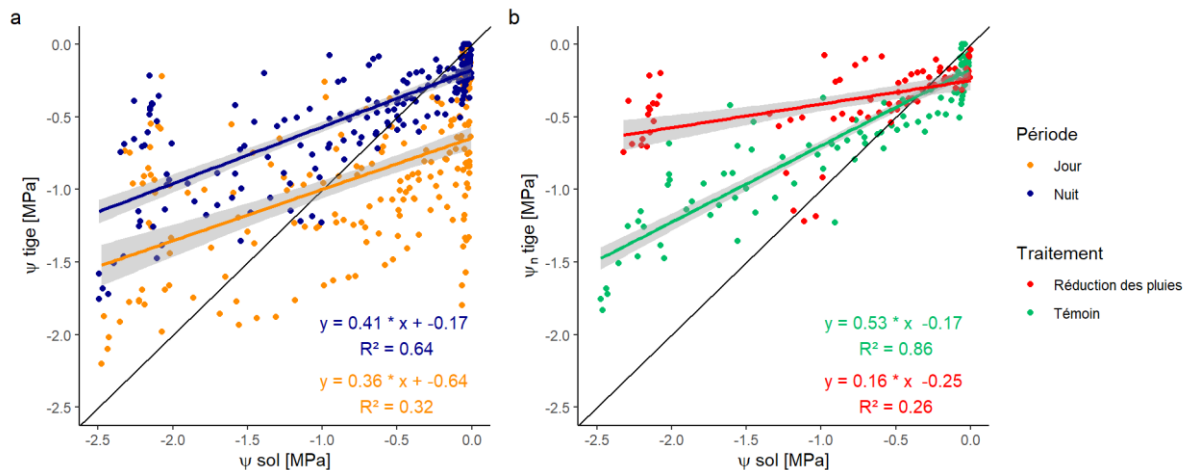


Figure 23. Relation entre le potentiel hydrique de la tige (MPa) et celui du sol issue des tensiomètres (MPa) pour les observations faites en journée (10h-15h) et la nuit (entre 00h et 06h) (a) et selon les deux traitements pour les observations de nuit (b). La période considérée s'étend de juillet à novembre 2022.

Les observations de la figure 23 rejoignent ce qui était attendu lorsque le potentiel hydrique du sol est élevé (proche de 0) avec un potentiel hydrique de la tige la nuit proche de celui du sol et un potentiel hydrique de jour plus faible que celui du sol. En revanche, lorsque le potentiel du sol diminue, le potentiel hydrique de la tige n'est plus en accord avec ce qui était théoriquement attendu. Le potentiel de sol devient plus faible que le potentiel de tige de nuit à partir de -0,5MPa. Alors qu'une pente de 1 était attendue pour les points de nuit, on observe finalement une pente de 0,41. Pour les points de jour, le potentiel hydrique du sol devient plus faible que la tige à partir de -0,8MPa. Il est étonnant que le potentiel de la tige soit plus élevé que le potentiel du sol. Cela conforte l'idée que le potentiel de sol mesuré ne soit pas égal au potentiel de sol ressenti par la plante dû à la profondeur des racines. La figure 23.b. met en évidence la différence de traitement et l'effet encore plus marqué de différence entre le potentiel mesuré et ressenti pour les semis sous le dispositif de réduction des pluies.

Utiliser l'amplitude journalière de potentiel de tige (différence entre le potentiel de nuit et de jour), comme réalisé dans la figure 24, permet de mettre en évidence le comportement des semis.

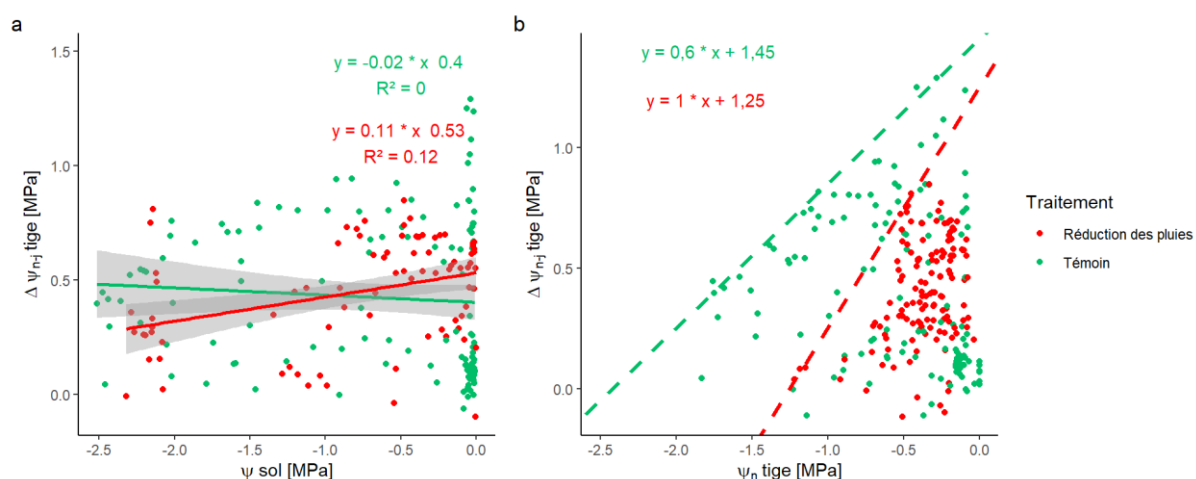


Figure 24. Relation entre la différence de potentiel de la tige [MPa], prise la nuit (entre minuit et 6h) et le jour (entre 10h-15h), et le potentiel du sol [MPa] pour le graphique a et du potentiel de tige de nuit pour le graphique b. Les deux graphiques sont illustrés selon le traitement et concernent les données de la zone HE3 de hêtre pour la période considérée entre juillet et novembre 2022. Les droites du graphique b ont été obtenues en utilisant les points limites.

La figure 24.(a) tente de mettre en évidence l'augmentation de l'amplitude journalière à mesure que le potentiel du sol diminue. Mais ce test n'est pas concluant, comme le montrent les valeurs de R^2 .

La figure 24.(b) reprend l'approche réalisée par Rambal (1992) et Borghetti et al (2004) en utilisant l'amplitude de potentiel journalier de la tige en fonction du potentiel de nuit de la tige en faisant l'hypothèse qu'il est égal au potentiel du sol réellement ressenti par le semis. Lorsque le stress hydrique lié au sol augmente, la différence de potentiel entre le jour et la nuit diminue. L'ordonnée à l'origine de la droite obtenue arbitrairement pour passer par les points limites permet de déterminer l'amplitude journalière maximale dans le semis sous une forte demande évaporative et avec une disponibilité optimale d'eau dans le sol. La pente de cette droite permet de déterminer la vitesse avec laquelle cette amplitude diminue à mesure que les ressources en eau diminuent. Une pente de 1 signifie que le semis a tendance à vouloir conserver une homéostasie de son potentiel grâce à la régulation stomatique. Cela correspondrait à un comportement isohydrique. Lorsque la pente diminue, le semis ne compense pas entièrement la diminution du potentiel hydrique du sol. Cela correspondrait à une stratégie plus anisohydrique. Les semis dans l'unité témoin auraient, d'après cette analyse, tendance à moins réguler leur potentiel hydrique, et ce, malgré des contraintes plus fortes et se placeraient donc comme plus anisohydrique sur le continuum que les semis sous le toit. À la vue de la différence de radiation et de profondeur racinaire, il aurait été plus logique d'observer le phénomène inverse. À nouveau, le manque de répétition dans les instruments de mesure du potentiel de tige mitige cette analyse.

4.3.2. Mesures ponctuelles du potentiel hydrique de la feuille

Pour continuer le chemin de l'eau, ce point s'intéresse au potentiel hydrique de la feuille. Les résultats du point précédent ne sont valables que pour une zone. C'est pourquoi des données de potentiel hydrique des feuilles ont été récoltées par la chambre à pression de Scholander pour toutes les zones entre juin et novembre 2022. Ces données ont été récoltées entre 10h et 15h et certaines mesures ont également été prises de nuit. Comme les données de teneurs en eau et potentiel issues des sondes

FDR présentes dans toutes les zones ont été écartées, les mesures à la chambre à pression ne peuvent être que comparées au potentiel des tensiomètres et psychromètres présent dans la zone HE3. Mais elles peuvent également être représentées seules comme sur la figure 25.

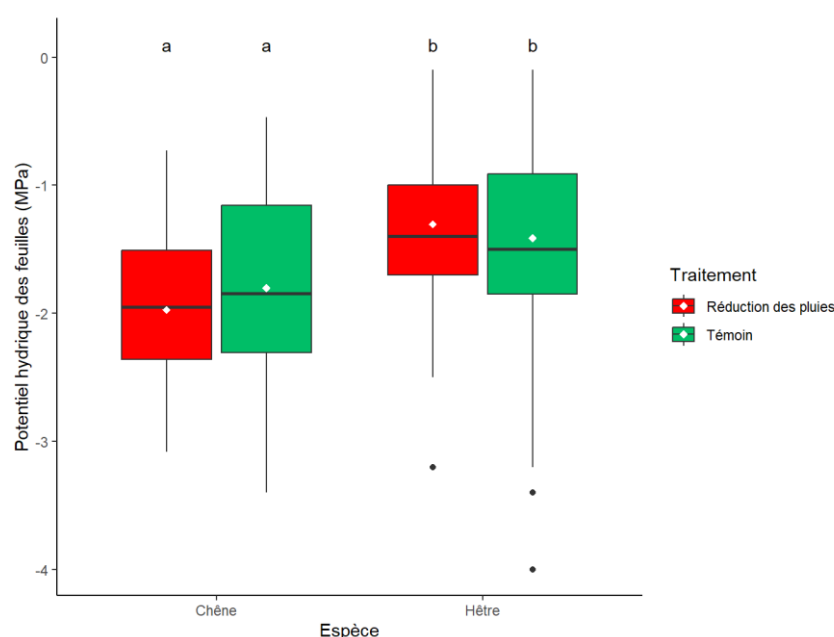


Figure 25. Impact de l'effet de l'espèce et du traitement sur le potentiel hydrique des feuilles obtenus par la chambre à pression de Scholander entre le 22 juin et le 1er novembre à $\pm 2h$ du midi solaire. L'ensemble des données représente 650 observations et couvre les 6 zones d'étude.

La figure 25 représente les valeurs moyennes de potentiel hydrique de la feuille selon le traitement pour chaque espèce. Le potentiel de feuille des chênes est significativement plus faible que pour les hêtres. Il est en moyenne de -1,9 MPa pour les chênes et -1,3 MPa pour les hêtres. Cette différence pourrait être expliquée par une différence anatomique entre les deux espèces, mais également par la différence de teneur en eau du sol (figure 13) liée à une demande évaporative plus grande dans les zones de chênes en raison d'une plus grande proportion de radiation arrivant aux semis (figure 10). Cet effet tend à appuyer l'importance du couvert pour la protection des sols et le risque que peuvent représenter des pratiques sylvicoles de coupe à blanc. En revanche, les mesures à la chambre à pression de Scholander ne permettent pas de mettre en évidence une différence significative au sein des traitements (p valeur = 0,794).

Il est donc intéressant de représenter ces données également sous forme de suivi temporel et de les mettre en lien avec les données de potentiel de tige disponibles pour la zone HE3.

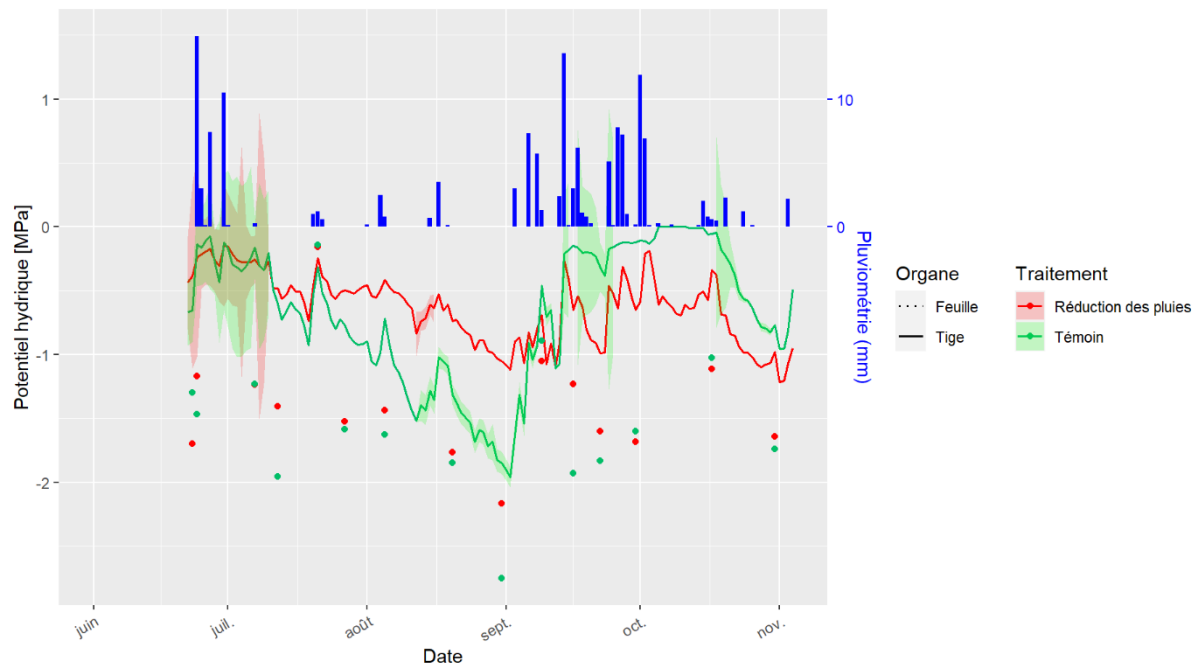


Figure 26. Suivi temporel du potentiel hydrique de la tige (ligne) obtenu par les sondes PSY1 et du potentiel des feuilles (points) obtenu via la chambre à pression de Scholander sur les heures entre ± 2 h du midi solaire pour la zone HE3 de hêtres sur la période entre juillet et novembre 2022.

Les tendances des mesures ponctuelles sur les feuilles sont relativement semblables aux mesures continues sur les tiges. L'effet du traitement semble être le même pour les deux jeux de données. Les mesures de feuilles sont en revanche systématiquement plus faibles que celles des tiges et cela est confirmé par la figure 27.(a). La différence de potentiel est particulièrement grande quand le potentiel de tige est faible et tend à diminuer avec l'augmentation du potentiel. Cela serait dû à la conductivité naturelle du système lié à la hauteur du semis ou au passage des cellules du mésophylle. Une autre explication serait un début de cavitation dans les vaisseaux du xylème. Les deux points de nuit où le potentiel de tige est plus faible que celui de la feuille sont étonnants et pourraient soit être dus à de la cavitation, ou à une imprécision des mesures. Les mesures du potentiel hydrique de feuille sont une moyenne de 3 répétitions sur des individus différents et les mesures de potentiel de tige sont une moyenne de 3 répétitions par un même capteur sur un même individu.

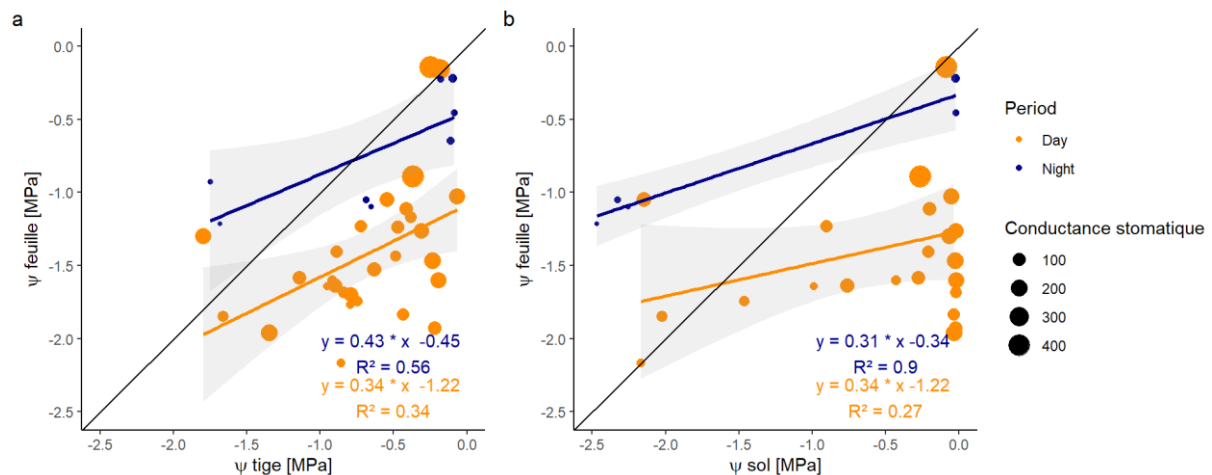


Figure 27. Relation entre le potentiel hydrique moyen de feuilles [MPa] mesuré avec la chambre à pression de

Scholander et le potentiel hydrique des tiges (a) et du sol (b) [MPa] pour la zone HE3. Les figures sont illustrées selon le traitement et la période de la journée (couleur) ainsi que par la conductance (taille) [mmol/m²/s]. Les périodes de jour correspondent à la période entre +2h du midi solaire et la période de nuit correspond à la période entre 00h et 06h.

La figure 27.(b) reprend la même approche que la figure 23.(a), mais avec le potentiel de feuille. Bien que les interceptes soient plus faibles comparé à la figure 23 (ce qui semble cohérent selon la figure 26.(a)), les pentes de ces équations restent relativement semblables et éloignées de la droite 1:1. Ce croisement de données tend à renforcer les hypothèses d'un système racinaire captant l'eau à des profondeurs plus importantes que 15cm là où les potentiels sont plus élevés.

4.3.3. La conductance stomatique

Pour mettre en lumière le comportement des semis face au stress hydrique et pour obtenir la transpiration réelle des semis il est important de mesurer la conductance stomatique. C'est pourquoi des mesures à l'aide d'un poromètre ont été réalisées dans toutes les zones et traitements conjointement avec le potentiel hydrique de feuilles.

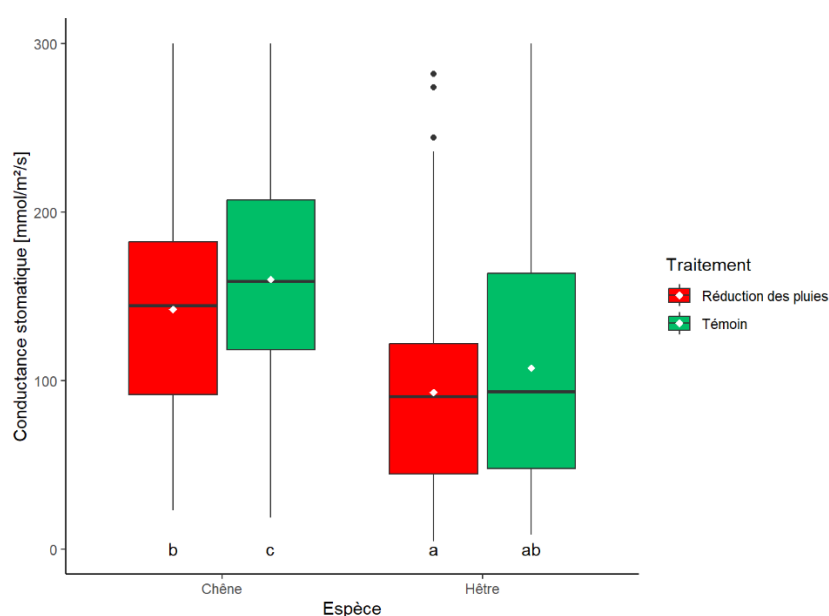


Figure 28. Impact de l'effet de l'espèce et du traitement sur la conductance stomatique obtenu par le poromètre entre le 22 juin et le 1er novembre à +-2h du midi solaire. L'ensemble des données représente 650 observations et couvre les six zones d'étude.

La figure 28 met en lumière l'effet du traitement et de l'espèce sur la conductance stomatique moyenne. Les semis de chêne sous le dispositif de réduction des pluies ont en moyenne une conductance de 33mmol/m²/s plus faible que l'unité témoin. Les semis de chêne de l'unité de réduction des pluies fermentaient davantage leurs stomates en raison d'une disponibilité en eau moins grande (figure 13) engendrant ainsi une différence non significative de potentiel de feuille entre les traitements (figure 25). La différence de conductance stomatique moyenne est en revanche moins présente pour les hêtres.

L'effet de l'espèce est significatif. La conductance stomatique des semis de chênes est plus élevée que ceux des semis de hêtres. Cela pourrait s'expliquer, d'une part par une demande évaporative plus

élevée en raison de la différence de radiation sur les différentes zones, et d'autre part par une plus faible régulation stomatique. Pour tenter de mieux comprendre la régulation des stomates, la conductance stomatique a été mise en relation avec toute une série de variables disponibles : le potentiel hydrique du sol, de la tige et de la feuille ainsi que les déficits de pression vapeur de l'atmosphère (Eq.4) et de la feuille (Eq.7). Pour chaque variable, une série d'équations bivariés (Eq.16-24) ont été testées pour déterminer la meilleure relation par variable indépendamment de l'espèce. Les résultats sont repris dans le tableau ci-dessous.

Tableau 7. Formes d'équations pour prédire la conductance à partir de chaque variable de manière indépendante pour l'ensemble des données regroupant des zones et des traitements différents.

VARIABLE	ÉQUATIONS	R ²	n
POTENTIEL HYDRIQUE DU SOL [MPa]	Exponentielle	0,22	23
POTENTIEL HYDRIQUE DE LA TIGE [MPa]	Exponentielle	0,25	30
POTENTIEL HYDRIQUE DE FEUILLE [MPa]	Exponentielle	0,24	127
DÉFICIT DE PRESSION VAPEUR DE L'AIR [kPa]	Inverse	0,25	140
DÉFICIT DE PRESSION VAPEUR DE FEUILLE [kPa]	Inverse	0,25	140
RADIATION [W/m ²]	Linéaire	0,039	140
Δ_{J-N} POTENTIEL HYDRIQUE DE LA TIGE [MPa]	Puissance	0,23	17

La radiation, malgré un ajustement au moyen des photos hémisphériques, a un coefficient de détermination trop faible pour être utilisé. Elle ne permet donc pas de prédire la conductance. La relation entre la conductance stomatique et le potentiel hydrique du sol, de tige, de feuille ainsi que les déficits de pression vapeur sont représentés dans la figure 29.

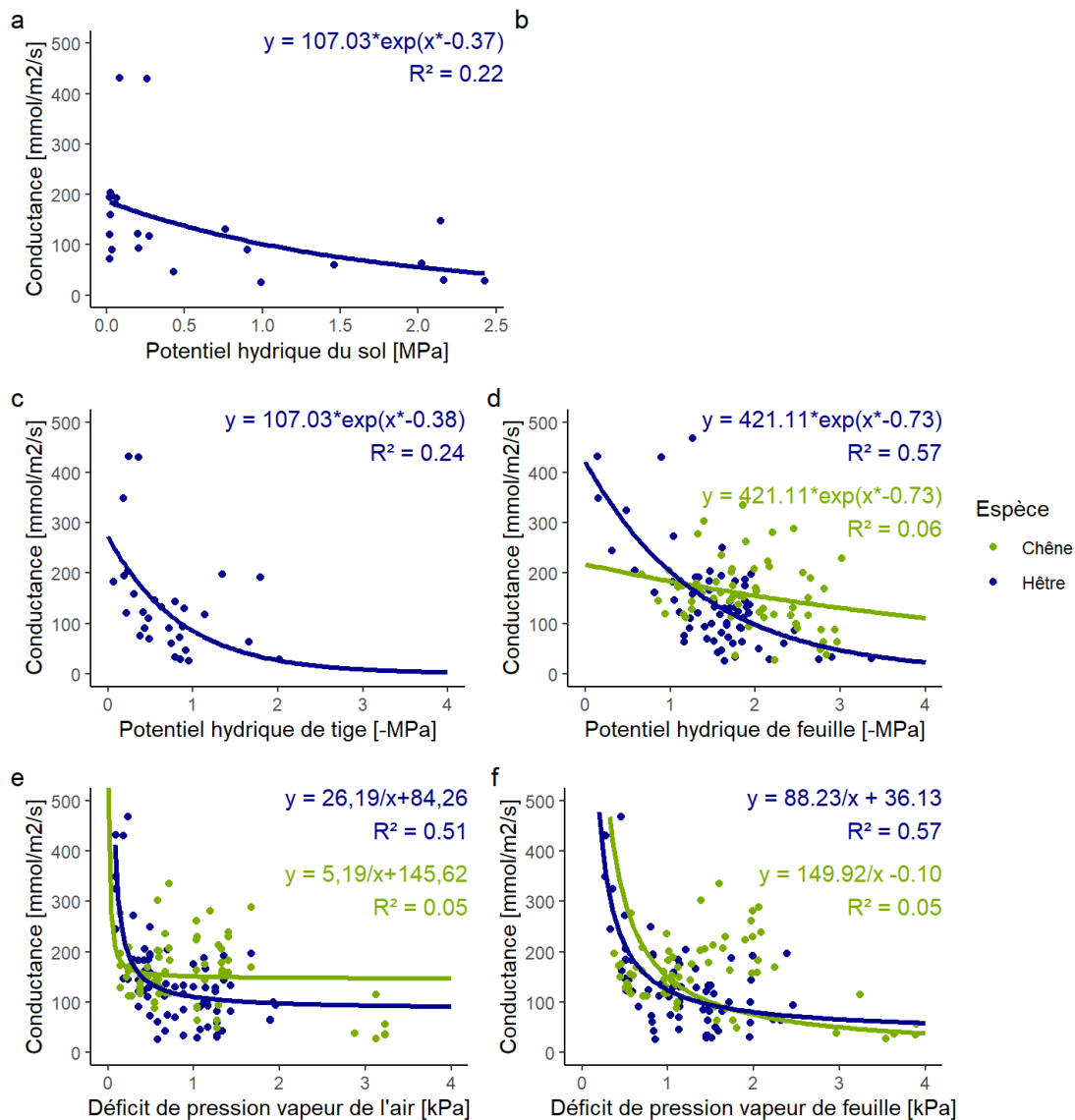


Figure 29. Relation entre la conductance stomatique [mmol/m²/s] et différentes variables illustrées selon l'espèce. Toutes les observations sont des moyennes horaires concernant des mesures faites entre +2h du midi solaire. Le potentiel du sol (a) provient des tensiomètres, celui de la tige (c) des psychromètres et celui de la feuille (d) de la chambre à pression. Les déficits de pression vapeur de l'air (e) et de la feuille (f) ont été calculés à l'aide des données météorologiques ainsi que de la température foliaire fournie par le poromètre (Eq.4 et Eq.7). Le choix de régression a été déterminé selon le tableau 7.

Pour le chêne, les trois variables disponibles capables d'expliquer la conductance stomatique produisent des résultats très peu probants en termes de coefficient de régression ($R^2=0,06$). L'analyse visuelle des figures 29.(e) et (f) semblent montrer une relation faible entre la demande atmosphérique et la conductance jusqu'à un déficit de pression vapeur de 2 ou 3 kPa, ensuite les semis de chêne semblent bel et bien diminuer leur conductance stomatique. Les chênes auraient un comportement plus anisohydrique que le hêtre et retarderaient plus la régulation. Cela est confirmé sur la figure 28 avec des moyennes de conductance stomatique plus élevée malgré une demande évaporative plus forte.

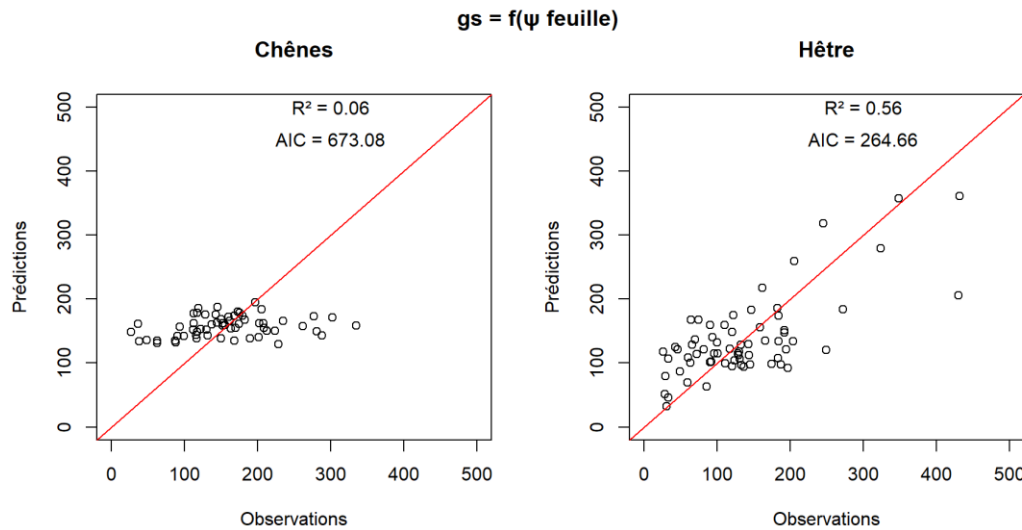


Figure 30. Résultats de prédiction de la conductance stomatique par un modèle bivarié utilisant le potentiel hydrique de la feuille pour des semis de chêne (à gauche) et de hêtre (à droite).

L'approche bivariée du modèle présenté dans la figure 30 n'est que peu satisfaisante pour le chêne, mais fonctionne relativement bien pour le hêtre dans la prédiction de la conductance stomatique avec un $R^2=0,56$. Pour obtenir d'encore meilleurs résultats, il pourrait être utile de mener une analyse multivariée prenant en compte différentes variables explicatives. C'est pourquoi différents modèles ont été testés (Eq.25,26,27). Les modèles les plus satisfaisants (qui minimisent l'AIC) sont ceux-ci :

$$gs = gs_{ref} \cdot f(\psi_{sol}) \cdot f(VPD) \quad (Eq.27)$$

$$gs = gs_{ref} \cdot f(\psi_{sol}) \cdot f(VPDL) \quad (Eq.27bis)$$

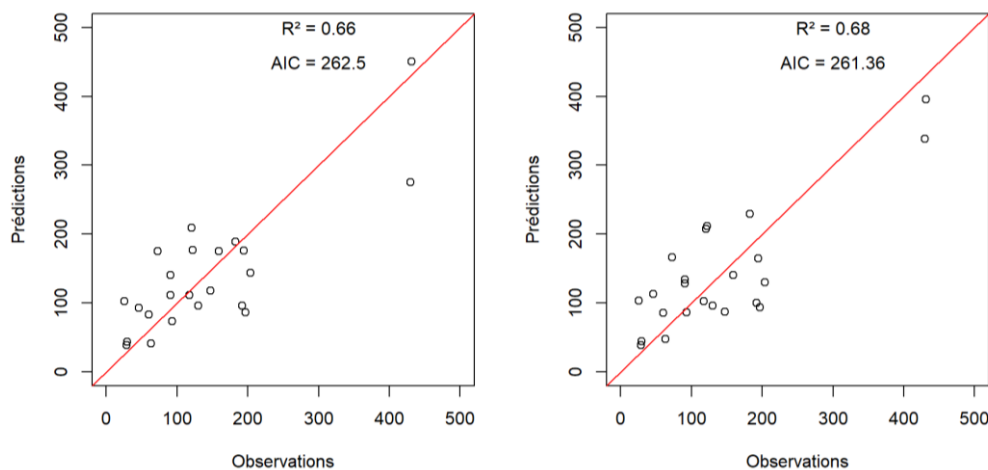


Figure 31. Résultats de prédiction de la conductance stomatique par des modèles multivariés avec comme variable explicative le potentiel hydrique du sol et le déficit de pression vapeur de l'air (gauche) et de la feuille (droite) pour les semis de hêtres.

Les modèles utilisant le potentiel hydrique du sol et le déficit de pression vapeur sont les plus performants et ont une signification physique intéressante, car ils prennent en compte la disponibilité de l'eau dans le sol et la demande évaporative. La conductance stomatique peut être prédite par la disponibilité et la demande en eau selon les équations suivantes développant les modèles de la figure 31 :

$$gc = (a \times e^{b \times \psi_s}) \times \left(\frac{c}{VPD} + d \right) \quad (Eq. 29)$$

$$gc = (a \times e^{b \times \psi_s}) \times \left(\frac{c}{VPDl} + d \right) \quad (Eq. 30)$$

où

- Ψ_s est le potentiel hydrique du sol [MPa]
- VPD est le déficit de pression vapeur de l'air [kPa]
- VPDl est le déficit de pression vapeur de la feuille [kPa]
- a, b, c et d sont des paramètres à optimiser

Parmi ces deux équations, le choix d'utiliser le VPDl permet d'améliorer un peu la prédiction, mais demande de connaître la température de la feuille. Or, cette température a été déterminée, dans ce cas-ci, grâce au poromètre. Le modèle utilisant le déficit de pression vapeur de l'atmosphère nécessite de connaître une variable de moins et serait donc privilégié si la température de feuille n'est pas disponible.

Le tableau 8 reprend les valeurs des différents paramètres des équations 29 et 30 pour les données de cette étude.

Tableau 8. Paramètres du modèle multivarié décrit par l'équation 24 et 25 prédisant la conductance stomatique pour les zones de hêtres.

	Eq. 24	Eq.25
PARAMÈTRE	valeur	valeur
A	8,733	7,698
B	0,444	0,456
C	4,065	5,202
D	10,881	3,372

4.4. Impact du dispositif de réduction des pluies sur la croissance et la survie des semis

Finalement, il convient de s'interroger au sujet de l'impact de la réduction des pluies sur l'accroissement radial et de la pousse terminale des semis de chênes et de hêtres. Les données disponibles couvrent la période 2021-2022 et 2022-2023.

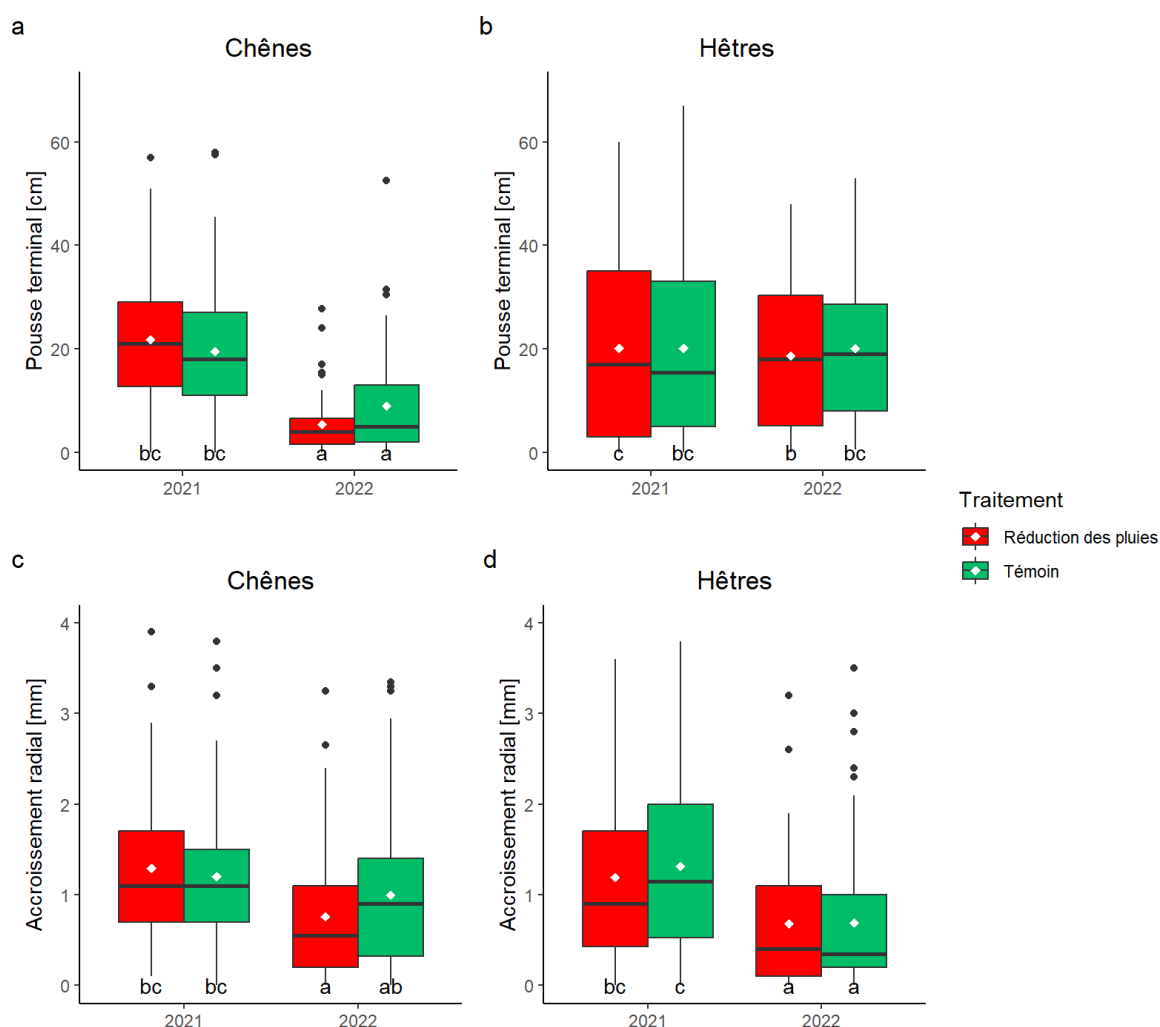


Figure 32. Pousse terminale (a et b) [cm] et accroissement radial (c et d) [mm] lors de l'année 2021 et 2022 des semis de chênes et de hêtres illustrés selon le traitement.

Tableau 9. Moyenne des accroissements terminaux et radiaux des semis de hêtres et de chênes pour l'année 2021 et 2022.

	CHÊNES		HÊTRES	
	2021	2022	2021	2022
POUSSE TERMINALE [cm]				
Témoins	19,22	7,54	21,48	18,28
Réduction des pluies	21,80	4,24	24,22	16,85
ACCROISSEMENT RADIAL [mm]				
Témoins	1,29	0,93	1,38	0,54
Réduction des pluies	1,25	0,68	1,17	0,59

Les résultats des mesures dendrométriques pour les années 2021 et 2022 montrent de manière générale une diminution de près de 80%. Les seules exceptions se trouvent dans l'accroissement radial des hêtres qui reste constant entre 2021 et 2022. La raison de la perte de croissance entre 2021 et 2022 vient probablement du contraste des conditions météorologiques de ces deux années. Le faible

taux de précipitations durant la période de végétation couplée à des demandes évaporatives importantes de l'année 2022 n'ont pas permis aux semis de pousser aussi bien qu'en 2021.

En revanche, l'effet du traitement n'est systématiquement pas significatif pour les deux accroissements et ce peu importe l'année et l'espèce. Une raison à cela est que la teneur en eau des sols a été chaque année relativement proche entre les traitements avec des sols presque saturés en 2021 et très secs en 2022. Néanmoins, on pourrait s'attendre à des résultats plus intéressants pour la saison de végétation de 2023 en raison de la différence de teneur en eau visible en avril 2023.

5. Synthèse

Cette cinquième partie synthétise les résultats décrits et les discussions amenées dans le point 4. Elle sera structurée autour des quatre questions posées dans la partie d'introduction.

- **Y a-t-il un impact du dispositif de réduction des pluies sur le statut hydrique du sol ?**

Comme attendu, la figure 12 représentant le suivi temporel de la teneur en eau du sol met en évidence une différence significative de statut hydrique du sol entre les deux traitements durant les périodes humides. En effet, le dispositif de réduction des pluies semble bel et bien capter une partie des précipitations rendant le sol sous le toit plus sec que dans l'unité de traitement témoin. En revanche, la différence d'humidité du sol diminue jusqu'à devenir non significative lors de périodes de sécheresse caractérisées par une faible pluviométrie et une forte demande évaporative. Cela a été le cas entre juillet et septembre 2022. Or, c'est durant cette période qu'une grande partie des mesures physiologiques ont été réalisées.

- **Y a-t-il un impact du dispositif de réduction des pluies sur le statut hydrique des semis ?**

Il est plus compliqué de mettre en évidence l'effet du dispositif de réduction des pluies sur le statut hydrique des semis.

Selon la figure 26, en faisant une moyenne du potentiel de feuilles mesurées dans chaque zone de hêtres et de chênes, aucune différence significative entre les traitements n'est observée. Ni les chênes ni les hêtres ne semblent avoir été impactés par le dispositif de réduction des pluies en termes de potentiel hydrique de feuille.

Plus étonnant encore, l'effet du traitement semble même inversé dans la zone HE3 de hêtres. En effet, l'unité de traitement témoin aurait atteint des valeurs de potentiel hydrique de tige et de feuille plus faibles que l'unité de réduction des pluies.

Cette absence de différence ou ces effets contraires à ceux attendus pour la zone HE3 pourraient être expliqués par les quatre points suivants:

- La temporalité de la campagne de mesure :

La campagne de mesure s'est déroulée entre juillet et novembre 2022 qui correspond à une période de faible disponibilité en eau du sol pour les deux traitements comme expliqués pour répondre à la question précédente. Cela a probablement entraîné un stress hydrique relativement semblable entre les deux traitements.

- Une adaptation morphologique des semis sous les dispositifs de réduction des pluies :

Les dispositifs de réduction des pluies ont été installés deux ans plus tôt. Comme nous l'affirmer les données de teneur en eau, ils engendrent une disponibilité en eau moins grande que pour le traitement témoin. Un stress hydrique continu sous le toit aurait poussé les semis à s'adapter morphologiquement en augmentant la proportion et la profondeur de leur système racinaire pour capter de l'eau plus profonde. Conjointement, l'été très humide de 2021a peut-être favorisé le développement très superficiel du système racinaire dans le dispositif témoin pour éviter l'asphyxie des racines. Ces hypothèses n'ont pas pu être confirmées par des mesures directes du système

racinaire dans le cadre de ce mémoire, mais sont fortement appuyées par les mesures réalisées dans la zone de hêtre HE3. Dans cette zone, grâce des capteurs de potentiel hydrique du sol et de la tige, une différence importante a été observée entre d'une part le potentiel du sol mesuré (à 15cm de profondeur) et d'autre part le potentiel du sol ressenti par le semis, et ce, particulièrement sous le dispositif de réduction des pluies (figure 23).

- Des demandes évaporatives différentes

Au-delà d'une adaptation racinaire, le cas de la zone HE3 peut être partiellement expliqué par une différence significative de radiation entre les deux traitements. Comme le montre la figure 10, bien que spatialement très proche, l'unité de réduction des pluies de la zone HE3 a un rayonnement transmis au semis très significativement plus faible que l'unité témoin en raison des différences dans la structure de la canopée. Cela entraînerait donc une demande évaporative moins grande et dès lors des potentiels de tige et de feuille moins négatifs.

- La précision et la variabilité des mesures

Pour caractériser le potentiel hydrique foliaire, plus de 650 mesures ont été réalisées à l'aide d'une chambre à pression de Scholander selon un protocole de sélection et manipulation de feuille. Pourtant, ces mesures pourraient être empreintes d'une certaine imprécision due à l'interprétation ainsi qu'à une variabilité importante liée à des feuilles provenant d'individus différents. Les mesures en continu de potentiel de tige (PSY1) et de sol (TEROS), quant à elles, souffrent d'un manque de répétition et sont également sensibles aux problèmes de calibration des capteurs ou à une mauvaise installation.

Au-delà de la comparaison de l'effet du traitement, la figure 26 permet également de mettre en évidence la différence significative de potentiel hydrique des feuilles de chêne et de hêtres. D'après les photos hémisphériques, le rayonnement arrivant au semis est plus important chez les chênes que chez les hêtres. Cela entraîne une teneur en eau et un potentiel de feuille plus faible. L'hypothèse de causalité entre ces deux mesures tend à montrer l'importance du couvert pour conserver l'humidité et les risques liés à des pratiques sylvicoles de coupe à blanc.

- **Comment évolue la conductance stomatique selon la disponibilité et la demande en eau ?**

La conductance stomatique a été mise en relation avec une série de variables de potentiel (sol, tige, feuille) et de demande atmosphérique (VPD, VPD_I) dans l'objectif de comprendre le statut hydrique et le comportement des semis.

Chez le chêne, la régulation stomatique ne semble se faire qu'à partir d'une demande évaporative assez élevée (figure 29). Les semis de chêne semblent plus anisohydrique que les semis de hêtre (figure 28). Les équations de régression testées sont assez peu convaincantes ($R^2=0,06$) pour prédire la conductance à partir du déficit de pression vapeur en raison de la grande variabilité de réponses parmi les semis à des déficits inférieurs à 2 kPa. Le potentiel hydrique foliaire n'ayant pas donné satisfaction dans cette étude pour prédire la conductance stomatique, une alternative aurait été d'avoir des données de potentiel hydrique du sol qui, liées au VPD, rendent compte de l'impact de la disponibilité et demande de l'eau sur la conductance.

Pour les hêtres, en revanche, une équation inverse entre la conductance stomatique et le déficit de pression vapeur de la feuille semble décrire relativement bien la relation ($R^2=0,57$). En ajoutant le potentiel hydrique du sol au modèle, la prédiction de la conductance stomatique s'améliore davantage ($R^2=0,68$). La conductance stomatique serait donc expliquée par la disponibilité en eau (potentiel du

sol) et la demande évaporative (déficit de pression vapeur). Cela semble tout à fait en accord avec les attentes théoriques.

Le déficit de pression vapeur de la feuille (VPDI) utilise la température de la feuille pour déterminer la demande évaporative et permet de se rapprocher des flux en place. Le déficit de pression vapeur de l'air (VPD) utilise une température de l'air qui dans ce cas-ci provient de la station météorologique. Le VPDI serait à privilégier si les données de température de feuille sont disponibles.

- **Quel est l'impact du dispositif de réduction des pluies sur la croissance des semis ?**

La pousse terminale et l'accroissement radial entre 2021 et 2022 ont diminué par rapport à 2020-2021 pour les deux espèces. Les deux saisons de végétations ont été très contrastées en termes de pluviométrie et de température, et cela s'est observé sur la croissance. L'été humide de 2021 a rendu la disponibilité en eau non limitante pour la croissance. En revanche l'été chaud et sec de 2022 aurait créé une diminution de la croissance. Pour le chêne, cette perte de croissance s'est ressentie principalement dans la pousse terminale alors que dans les zones de hêtres, c'est l'accroissement radial qui a chuté de manière importante. Ce sont bien les chênes qui semblent avoir le plus souffert des conditions de l'année 2022 avec une diminution de la croissance terminale de près de 80%. L'effet des conditions météorologiques sèches et chaudes de 2022 a probablement été accentué dans les zones de chênes par la forte demande évaporative liée à la plus faible couverture de la canopée.

En revanche, l'effet du traitement n'est que peu marqué sur la croissance, ni pour les semis de chênes ni pour les semis de hêtres. L'effet du traitement a pu être observé sur le sol à des moments de l'année où la ressource en eau n'est pas limitante. En revanche, pendant l'été, les statuts hydriques du sol fort similaires entre les deux traitements a entraîné une différence de stress faible qui a potentiellement été comblée par des adaptations racinaires sous les toits.

La saison de végétation 2023 sera probablement plus intéressante pour observer des différences de croissance entre les traitements, en raison d'un écart en teneur en eau plus important au printemps et à une pluviométrie conservant cette différence au cours de l'été.

6. Conclusion

Ce mémoire consistait à évaluer l'impact des changements climatiques et particulièrement des sécheresses sur les semis de chêne sessile et de hêtre commun. L'objectif était de mieux comprendre les processus en jeu entre la disponibilité en eau, la demande atmosphérique, le stress hydrique et la croissance. Pour ce faire, un dispositif expérimental de réduction des pluies a été installé et une série de mesures environnementales, physiologiques et édaphiques ont été réalisées.

Les résultats de cette étude ont montré, grâce à deux années contrastées, l'effet de la sécheresse et de la chaleur sur la croissance des semis. Aussi bien les semis de hêtre que les semis de chêne ont été impactés par les vagues de chaleur de l'année 2022. Les prédictions climatiques d'une augmentation en nombre et en sévérité des sécheresses estivales posent donc question pour la survie et la croissance des semis d'aujourd'hui et des forêts de demain. Il convient donc d'être particulièrement attentif au choix d'essence, mais également aux méthodes sylvicoles de régénération. En effet, les semis de chêne sessile, attendus comme davantage résistants à la sécheresse, ont en réalité été plus fortement impactés dans leur croissance. Le milieu plus ouvert des zones de chênes, augmentant donc la demande évaporative, est une hypothèse expliquant cet effet. Cela contribue à mettre en lumière l'impact de pratiques sylvicoles de coupe à blanc et plaide en faveur d'une régénération sous couvert.

Grâce aux mesures réalisées, il a été permis de rentrer davantage en détail dans cette perte de croissance. Le statut hydrique du sol et la demande évaporative ont bel et bien pu être mis en relation avec le potentiel hydrique au sein du semis et avec la conductance stomatique. Des stratégies différentes de régulation ont pu être observées avec le chêne se plaçant comme plus anisohydrique que le hêtre qui a tendance à réguler plus tôt. Un modèle prédisant la conductance stomatique des semis de hêtre a pu être proposé à partir de deux variables indépendantes : le potentiel hydrique du sol et le déficit de pression vapeur.

Le dispositif de réduction des pluies n'a en revanche eu que peu d'impact. Bien que fonctionnel et entraînant une diminution de la teneur en eau et du potentiel hydrique du sol, la sécheresse artificielle a presque complètement été éclipsée par la sécheresse naturelle. Un effet inverse a même été observé dans une des zones d'étude en raison d'une différence de radiation ainsi qu'une probable adaptation du système racinaire pour capter de l'eau en profondeur.

Il est en revanche attendu que l'étude de la saison de 2023 soit très intéressante en raison de la différence de statut hydrique très claire au printemps entre les deux traitements et à des précipitations suffisantes durant l'été. Les dispositifs en place ont encore un grand intérêt et les objectifs fixés par le programme de recherche REGE+ peuvent être encore approfondis. Dans un souci de modéliser la croissance des semis et des forêts, l'impact du manque d'eau ne peut pas encore être pris en compte. Établir des liens entre croissance et conductance stomatique, prendre en compte la surface foliaire et la longueur racinaire ou encore comparer des traitements aux résultats différents pour vérifier la probité sont autant de pistes qui vont pouvoir être creusées dans le cadre du programme REGE+, et notamment par le biais du mémoire de Gilles Tilman.

Bibliographie

- Adams, S., Meekins, R., Beling, P. A., Farinholt, K., Brown, N., Polter, S., & Dong, Q. (2017). A comparison of feature selection and feature extraction techniques for condition monitoring of a hydraulic actuator. In Annual Conference of the PHM Society (Vol. 9, No. 1).
- Baldwin, D.S., Upadhyaya, M.K., Nason, M.A., & Lauenroth, W.K. (2014). Comparison of three methods for measuring soil water potential in sagebrush steppe plant communities. *Journal of Arid Environments*, 102, 104-107.
- Bays, E., Lambinet, M., & Colson, V. (2021). *PanoraBois- Wallonie- Edition 2021*. Office Wallon du bois.
- Benson, M. C., Miniati, C. F., Oishi, A., Denham, S. O., Domec, J.-C., Johnson, D. M. et al. (2022). The xylem of anisohydric *Quercus alba* L. is more vulnerable to embolism than isohydric codominants. *Plant, Cell & Environment*, 45, 329– 346. <https://doi.org/10.1111/pce.14244>
- Bhaskar, R., Arreola, F., Mora, F., Martinez-Yrizar, A., Martinez-Ramos, M., & Balvanera, P. (2018). Response diversity and resilience to extreme events in tropical dry secondary forests. *Forest Ecology and Management*, 426, pages 61-71. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.028>
- Bonheure, M.(2022). Effets des caractéristiques du peuplement et du traitement sylvicole sur la résilience des forêts face aux tempêtes dans le contexte du changement climatique. Faculté des bioingénieurs, Université catholique de Louvain. Prom. : Ponette, Quentin ; Jonard, Mathieu. <http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:35756>
- Borghetti, M., Magnani, F., Fabrizio, A., & Saracino, A. (2004). Facing drought in a Mediterranean post-fire community: tissue water relations in species with different life traits. *Acta Oecologica*, 25(1-2), 67-72.
- Bussotti, F., Pollastrini, M., Holland, V., & Bruggemann, W. (2015). Functional traits and adaptive capacity of European forests to climate change. *Environmental and Experimental Botany*, 111, 91-113. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.11.006>
- Cambell Scientific. (2020). Product Manual: CS616 and CS625 Water Content Reflectometers. Récupéré sur https://s.campbellsci.com/documents/eu/manuals/cs616_625%20-%20467.pdf
- Choat, B.; Jansen, S.; Brodribb, T. J.; Cochard, H.; Delzon, S.; Bhaskar, R.; Bucci, S. J.; Feild, T. S.; Gleason, S. M.; Hacke, U. G.; Jacobsen, A. L.; Lens, F.; Maherali, H.; Martínez-Vilalta, J.; Mayr, S.; Mencuccini, M.; Mitchell, P. J.; Nardini, A.; Pittermann, J.; Pratt, R. B.; Sperry, J. S.; Westoby, M.; Wright, I. J.; Zanne, A. E. (2012). Global Convergence in the Vulnerability of Forests to Drought. *Nature*, 491(7426), 752–755. <https://doi.org/10.1038/nature11688>.
- Chaliès, S., Amathieu, J., & Bertone, S. (2013). Former les enseignants pour accroître leur satisfaction au travail : propositions théoriques et illustrations empiriques. *Travail Humain*, 76(4), 309-334. <http://dx.doi.org/10.3917/th.764.0309>
- Chevassus-Au-Louis, B., Pirard, R. (2011). Les services écosystémiques des forêts et leur rémunération éventuelle. *Revue forestière française*, vol. LXIII, n° 5, pp. 579-599. DOI : [10.4267/2042/46106](https://doi.org/10.4267/2042/46106)
- Chevassus-Au-Louis, B. (2012). Les services écologiques des forêts : définition des concepts, origine et typologies. *Revue forestière française*, 64 (3), pp.213-224. DOI : [10.4267/2042/48430](https://doi.org/10.4267/2042/48430)

- Choat, B., Jansen, S., Brodribb, T. et al. (2012). Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature* 491, 752–755 <https://doi.org/10.1038/nature11688>
- Claessens H., Grégoire J.-C., Guns A., Himpens S., Hoyaux J., Laurent C., Marbaix P., Marchal D., Mertens P., Ponette Q., Servais A., Vancayemberg F., Vincke C. et al. (2017). Le changement climatique et ses impacts sur les forêts wallonnes. Recommandations aux décideurs, propriétaires et gestionnaires – Version 2017. 84p.
- Cochard, H.; Pimont, F.; Ruffault, J.; Martin-StPaul, N. (2021). SurEau: A Mechanistic Model of Plant Water Relations under Extreme Drought. *Annals of Forest Science*, 78(2), 55. <https://doi.org/10.1007/s13595-021-01067-y>.
- Cornic, G. (2008). Effet de la contrainte hydrique sur la photosynthèse foliaire: De l'utilisation expérimental des relation A/Ci et Acc. Université Paris-Saclay.
- Couvreur, V.; Ledder, G.; Manzoni, S.; Way, D. A.; Muller, E. B.; Russo, S. E. (2018). Water Transport through Tall Trees: A Vertically Explicit, Analytical Model of Xylem Hydraulic Conductance in Stems. *Plant Cell Environ*, 41(8), 1821–1839. <https://doi.org/10.1111/pce.13322>.
- Damour, G. (2010). Bases théoriques et approches expérimentales de la modélisation des effets de la contrainte hydrique sur les échanges gazeux foliaires du manguier et du litchi. *Sciences de la Terre*. Université de la Réunion, Français. . <https://theses.hal.science/tel-00473059>
- Destrée, B. (2018). Réponse du système racinaire de *Dactylis glomerata* et *Medicago sativa* à une contrainte hydrique en culture pure et en association. *Faculté des bioingénieurs, Université catholique de Louvain, Prom. : Draye, Xavier ; Javaux, Mathieu*. <http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:17233>
- De Vos, B.; Cools, N.; Verstraeten, A.; Neiryndck, J. Accurate Measurements of Forest Soil Water Content Using FDR Sensors Require Empirical in Situ (Re)Calibration. *Appl.Sci.*2021,11,11620. <https://doi.org/10.3390/app112411620>
- de Wergifosse, `Louis; André, F.; Goosse, H.; Boczon, A.; Cecchini, S.; Ciceu, A.; Collalti, A.; Cools, N.; D'Andrea, E.; De Vos, B.; Hamdi, R.; Ingerslev, M.; Knudsen, M. A.; Kowalska, A.; Leca, S.; Matteucci, G.; Nord-Larsen, T.; Sanders, T. G.; Schmitz, A.; Termonia, P.; Vanguelova, E.; Van Schaeybroeck, B.; Verstraeten, A.; Vesterdal, L.; Jonard, M.(2022) Simulating Tree Growth Response to Climate Change in Structurally Diverse Oak and Beech Forests. *Science of The Total Environment*, 806, 150422. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150422>.
- de Wergifosse, L.; André, F.; Beudez, N.; de Coligny, F.; Goosse, H.; Jonard, F.; Ponette, Q.; Titeux, H.; Vincke, C.; Jonard, (2020). M. HETEROFOR 1.0: A Spatially Explicit Model for Exploring the Response of Structurally Complex Forests to Uncertain Future Conditions – Part 2: Phenology and Water Cycle. *Geosci. Model Dev*, 13 (3), 1459–1498. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-1459-2020>.
- Dixon, H. H., & Joly, J. (1895). XII. On the ascent of sap. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. (B.), (186), 563-576.
- Dizengremel, P.; Rambal, S.; Cruziat, P.; Saugier, B.; Aussenac, G. (2020). Université de Nancy 1 BP 239 54506 Vandoeuvre-les-Nancy cedex.
- Eurostat. (2021). Forest area and characteristics. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Forest_area_and_characteristics

- FAO. (2020). Global Forest Resources Assessment 2020. Main Report. <http://www.fao.org/3/ca8752en/ca8752en.pdf>
- Fauchard, C., Guilbert, V., Sagnard, F., Froumentin, M. (2009). Mesures de teneurs en eau volumique et massique sur du sable. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées ,274,pp 109-125.hal-00425429
- Gardner, W. H. (1965). Water content. Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling, 9, 82-127.
- Ha, M., Morrow, M., Algiers, K., (2023), 17.1.3: Cohesion-Tension theory. ASCCC Opzn Educational Resources Initiative. [https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Botany/Botany_\(Ha_Morrow_and_Algiers\)/Unit_3%3A_Plant_Physiology_and_Regulation/17%3A_Transport/17.01%3A_Water_Transport/17.1.03%3A_Cohesion-Tension_Theory](https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Botany/Botany_(Ha_Morrow_and_Algiers)/Unit_3%3A_Plant_Physiology_and_Regulation/17%3A_Transport/17.01%3A_Water_Transport/17.1.03%3A_Cohesion-Tension_Theory)
- Henrion, M. (2021). Étude de l'impact des propriétés hydrauliques du sol sur la régulation de la transpiration du tournesol (*Helianthus annuus*) en conditions contrôlées. Faculté des bioingénieurs, Université catholique de Louvain, Prom. : Javaux, Mathieu. <http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:30415>
- Hochberg, U., Rockwell, F. E., Holbrook, N. M., & Cochard, H. (2018). Iso/anisohdry: a plant–environment interaction rather than a simple hydraulic trait. Trends in plant science, 23(2), 112-120.
- Holling, C. S. (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems. Annual Review of Ecology and Systematics, 4, 1–23. <http://www.jstor.org/stable/2096802>
- ICT Instrument (2019),” Psychrometer PSY1 Manual PSY1-Stem and PSY1-Leaf” Operation Manual DOC-00087-02. <https://www.ictinternational.com/content/uploads/2014/03/PSY1-Manual-DOC-00087v2.pdf>
- IRM (2022). Dico météo : Vague de chaleur. Consulté le 5/7/2023. <https://www.meteo.be/fr/infos/dico-meteo/vague-de-chaleur>
- IUCN (2023), issues briefs: Forest and climate change. <https://www.iucn.org/resources/issues-brief/forests-and-climate-change>
- Koverda, P., (2020). The ultimate vapor pressure deficit (vpd) guide. Pulsegrow. Consulté le 4/5/2023. <https://pulsegrow.com/blogs/learn/vpd>
- Leskinen, P., Cardellini, G., García, S., Hurmekoski, E., Sathre, R., Seppälä, J., Smyth, C., Stern, T., Verkerk, H. (2018). Substitution effects of wood-based products in climate change mitigation.
- Leuschner, C., Backes, K., Hertel, D., Schipka, F., Schmitt, U., Terborg, O., Runge, M. (2001). Drought responses at leaf, stem and fine root levels of competitive *Fagus sylvatica* L. and *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. trees in dry and wet years, Forest Ecology and Management, Volume 149, Issues 1–3, Pages 33-46, ISSN 0378-1127, [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00543-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00543-0).
- Lin, Y., Grace, J., Zhao, W., Dong, Y., Zhang, X., Zhou, L., ... & Zhang, Y. (2018). Water-use efficiency and its relationship with environmental and biological factors in a rubber plantation. Journal of hydrology, 563, 273-282.

- Martin-StPaul, N.; Delzon, S.; Cochard, H. (2017). Plant Resistance to Drought Depends on Timely Stomatal Closure. *Ecol Lett*, 20 (11), 1437–1447. <https://doi.org/10.1111/ele.12851>.
- McDowell, N.; Pockman, W. T.; Allen, C. D.; Breshears, D. D.; Cobb, N.; Kolb, T.; Plaut, J.; Sperry, J.; West, A.; Williams, D. G.; Yepez, E. A. (2008) Mechanisms of Plant Survival and Mortality during Drought: Why Do Some Plants Survive While Others Succumb to Drought? *New Phytologist*, 178 (4), 719–739. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02436.x>.
- McDowell, N. G.; Allen, C. D. (2015). Darcy's Law Predicts Widespread Forest Mortality under Climate Warming. *Nature Clim Change*, 5 (7), 669–672. <https://doi.org/10.1038/nclimate2641>.
- METER group. (2023). TEROS 21: Soil water potential sensor. <https://www.metergroup.com/environment/products/teros-21-soil-water-potential-sensor/>
- METER group (2023). WP4C: soil water potential lab instrument. <https://www.metergroup.com/en/meter-environment/products/wp4c-soil-water-potential-lab-instrument>
- Mievis, P., (2022). Bilan de la vague de chaleur d'août 2022. Météo Belgique. Consulté le 12/2/2023. <https://www.meteobelgique.be/article/nouvelles/la-suite/2487-bilan-de-la-vague-de-chaleur-d-août-2022>
- Monteith, J. L., Campbell, G. S. & Potter, E. A. (1998). 'Theory and performance of a dynamic diffusion porometer'. *Agric. For. Meteorol.* 44,27-38.
- Mukhlisin, M., & Saputra, A. (2013). Performance evaluation of volumetric water content and relative permittivity models. *The Scientific World Journal*, 2013.
- Ndam, M. (2021) Acquisition de données sur terrain en vue de tester la capacité des modèles de végétation à prédire les différences de productivité entre variétés d'espèces cultivées (Mémoire de fin d'étude, Université catholique de Louvain).
- Nikinmaa, L., Lindner, M., Cantarello, E. et al. (2020). Reviewing the Use of Resilience Concepts in Forest Sciences. *Curr Forestry Rep* 6, 61–80. <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00110-x>
- Orazio, C., Stojnic, S., Stojanović, D., Gartzia-Bengoetxea, N., Hayes, S. (2014). Influence du changement climatique sur les forêts européennes et sur le secteur forestier - [www.rokfor.eu. 10.13140/RG.2.2.19533.491](http://www.rokfor.eu.10.13140/RG.2.2.19533.491)
- Petit, S., Cordier, S., Claessens, H., Ponette, Q., Vincke, C., Marchal, D., & Weissen, F. (2017a). Hêtre. Fichier écologique des essences. <https://www.fichierecologique.be/#!/>
- Petit, S., Cordier, S., Claessens, H., Ponette, Q., Vincke, C., Marchal, D., & Weissen, F. (2017a). Chêne sessile. Fichier écologique des essences. <https://www.fichierecologique.be/FEECS/>
- PMSInstrument. (2023). Pressure chamber model 1505D-EXP <https://www.pmsinstrument.com/products/model-1505d-exp-pressure-chamber-instrument-with-cavitation-chamber/>
- Rambal, S., & Debussche, G. (1995). Water balance of Mediterranean ecosystems under a changing climate. In *Global change and Mediterranean-type ecosystems* (pp. 386-407). New York, NY: Springer New York.

- Rennotte, O. (2018). Développement de rhizotrons compartimentés pour l'analyse du système racinaire du maïs sous déficit hydrique. Faculté des bioingénieurs, Université catholique de Louvain, 2018. Prom. : Draye, Xavier. <http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:14902>
- Roman-Amat, B. (2007). Préparer les forêts françaises au changement climatique (p. 125).
- Ryelandt, B. (2019) Modeling oak and beech regeneration in mixed and uneven-aged forests : a process-based approach for changing environments. Faculté des bioingénieurs, Université catholique de Louvain. Prom. : Jonard, Mathieu. <http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:22372>
- Sack, L., Holbrook, M., (2006). Leaf hydraulic. Annual review of plant biology. Vol. 57:361-381. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144141>
- Saliendra, N., & Meinzer, F.C. (1989). Relationship Between Root/Soil Hydraulic Properties and Stomatal Behaviour in Sugarcane. Functional Plant Biology. 16. 241-250. 10.1071/PP9890241.
- Simonin, K. A.; Burns, E.; Choat, B.; Barbour, M. M.; Dawson, T. E.; Franks, P. J. (2015). Increasing Leaf Hydraulic Conductance with Transpiration Rate Minimizes the Water Potential Drawdown from Stem to Leaf. Journal of Experimental Botany, 66 (5), 1303–1315. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru481>.
- Skierucha, W., Wilczek, A., Alokhina, O. (2008). Calibration of a TDR probe for low soil water content measurements, Sensors, and Actuators A: Physical, Volume 147, Issue 2, Pages 544-552, ISSN 0924-6460
- Sperry, J., Love, M. (2015), What plant hydraulics can tell us about responses to climate-change droughts. New Phytologist. 207:14-27. <https://doi.org/10.1111/nph.13354>
- SPW Environnement. (2023). Bois de Lauzelle. La biodiversité en Wallonie. <http://biodiversite.wallonie.be/fr/219-bois-de-lauzelle.html?IDD=251659334&IDC=1881>
- TMS lab. (2023). WP4 : soil water potential lab instrument WP4C <https://www.tms-lab.com/product/soilwater-potential-lab-instrumentation-meter-wp4c/>
- Thom, D. and Seidl, R. (2016), Natural disturbance impacts on ecosystem services and biodiversity in temperate and boreal forests. Biol Rev, 91: 760-781. <https://doi.org/10.1111/brv.12193>
- Thompson, I., Mackey, B., McNulty, S., Mosseler, A. (2009). Forest Resilience, Biodiversity, and Climate Change. A synthesis of the biodiversity/resilience/stability relationship in forest ecosystems. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal. Technical Series no. 43, 67 pages.
- Topp, G. C., Parkin, G. W., Ferré, T. P., Carter, M. R., & Gregorich, E. G. (2008). Soil water content. Soil sampling and methods of analysis, 2, 939-962.
- UCLouvain. (2023). Bois de Lauzelle (LLN). <https://uclouvain.be/fr/decouvrir/bois-de-lauzelle-lln.html>
- Vanbeneden, A., (2022). Simulations de dynamiques forestières dans le bois de Lauzelle selon différentes stratégies de gestion. Faculté des bioingénieurs, Université catholique de Louvain. Prom. : Jonard, Mathieu. Ponette, Quentin.

- Vandermeulen, Robin. Caractérisation de l'architecture hydraulique du colza in situ (*Brassica napus* L.). Faculté des bioingénieurs, Université catholique de Louvain, 2021. Prom. : Mathieu Javaux. <http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:30527>
- Van Genuchten, M. Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:892-898. <https://hwbdocuments.env.nm.gov/Los%20Alamos%20National%20Labs/TA%2054/11569.pdf>
- van Ypersele, J.-P., Marbaix, P., Lamarque, P., & Rondiat, E. (2021). Changements climatiques 2021 : Les éléments scientifiques- Aperçu du Résumé pour les décideurs. Plateforme Wallonne pour le GIEC, Lettre n°21-Edition spéciale-Aout 2021, 5p.
- Vincke, C., (2022). Cours LBIRF2104 : Ecologie des forêts [Slides PowerPoint]. UCLouvain, Master en Bioingénieur.
- Ziegler, C. (2021). Diversité des mécanismes de résistance à la sécheresse des arbres en forêt tropicale humide. Biologie végétale. Université de Lorraine.

Impact d'un dispositif de réduction des précipitations sur le statut hydrique de semis de chênes et de hêtres

Félix Guillaume

Les forêts jouent un rôle capital pour l'homme et pour l'environnement à travers un très large éventail de biens et services écosystémiques. Or ces services sont menacés par les changements climatiques qui impactent les forêts. L'augmentation des températures et des événements extrêmes ainsi que la diminution des précipitations estivales pourrait mener à une perte de croissance et à une mortalité importante due au stress hydrique.

C'est dans un objectif de résilience des forêts que se base ce mémoire qui a pour but de caractériser le stress hydrique, d'en comprendre les causes et d'en étudier les conséquences. Étant rattaché au programme de recherche REGE+, ce mémoire réalise une expérience dans le bois de Lauzelle au moyen d'un dispositif de réduction des pluies captant 2/3 des précipitations dans le but de créer une sécheresse artificielle sur des semis de chênes sessile et de hêtres commun. De nombreuses mesures de variables édaphiques, physiologiques et météorologiques ont été réalisées dans le but de caractériser les statuts hydriques du sol, des semis et de l'atmosphère.

Les résultats de cette étude ont montré, grâce à deux années contrastées de 2021 et 2022, l'effet de la sécheresse et de la chaleur sur la croissance des semis. Aussi bien les semis de hêtre que les semis de chêne ont été impactés par les vagues de chaleur de l'année 2022. Les prédictions climatiques d'une augmentation en nombre et en sévérité des sécheresses estivales posent donc question pour la survie et la croissance des semis d'aujourd'hui et des forêts de demain. Il convient donc d'être particulièrement attentif au choix d'essence, mais également aux méthodes sylvicoles de régénération. En effet, les semis de chêne sessile, attendus comme davantage résistants à la sécheresse, ont en réalité été plus fortement impactés dans leur croissance. Le milieu plus ouvert des zones de chênes, augmentant donc la demande évaporative, est une hypothèse expliquant cet effet. Cela contribue à mettre en lumière l'impact de pratiques sylvicoles de coupe à blanc et plaide en faveur d'une régénération sous couvert.

Grâce aux mesures réalisées, il a été permis de rentrer davantage en détail dans cette perte de croissance. Le statut hydrique du sol et la demande évaporative ont bel et bien pu être mis en relation avec le potentiel hydrique au sein du semis et avec la conductance stomatique. Des stratégies différentes de régulation ont pu être observées avec le chêne se plaçant comme plus anisohydrique que le hêtre qui a tendance à réguler plus tôt. Un modèle prédisant la conductance stomatique des semis de hêtre a pu être proposé à partir de deux variables indépendantes : le potentiel hydrique du sol et le déficit de pression vapeur.

Le dispositif de réduction des pluies n'a en revanche eu que peu d'impact. Bien que fonctionnel et entraînant une diminution de la teneur en eau et du potentiel hydrique du sol, la sécheresse artificielle

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
Faculté des bioingénieurs

Croix du Sud, 2 bte L7.05.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/agro